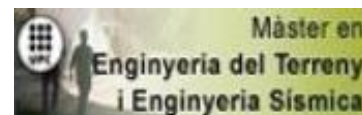


2017

MODELACIÓN FÍSICA DE LOS PROCESOS DE INTERACCIÓN SUELO-ATMOSFERA



TRABAJO FINAL DE MÁSTER



TÍTULO

**MODELACIÓN FÍSICA DE LOS PROCESOS DE INTERACCIÓN
SUELO-ATMOSFERA**

AUTOR

LUMERLI OVIEDO ABREU

TUTOR

JEAN VAUNAT

MARCEL HURLIMANN

ESPECIALIDAD

INGENIERÍA GEOTÉCNICA

FECHA

MAYO 2017



Dept. d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica
E.T.S. Enginyers de Camins, Canals i Ports

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



Agradecimientos

En primer lugar darle las gracias a **Dios**, por el simple hecho de permitirme estar viva y sana y nunca dejarme sola.

Luego agradecer a todas las personas que de una forma u otra, han formado parte de la realización de este proyecto, familia, amigos, etc. Darles las gracias especialmente a mí magnífica madre **Lourdes Abreu**, por su apoyo incondicional y amor infinito y a **Gabriel Mitander**, por ser más de lo que puedo pedir y siempre motivarme a terminar mis estudios.

Gracias a mis tutores y co-tutores, Marcel Hurlimann, Jean Vaunat y Antonio Lloret, por su gran paciencia y dedicación para que culminara este trabajo final de master.

Resumen

El trabajo de fin de MASTER se centra en el diseño, preparación y comprobación de una columna de infiltración destinada a evaluar la respuesta hidráulica de una columna de suelo no saturada.

Este trabajo se inscribe en la problemática más general de la evaluación del efecto del cambio climático sobre los procesos de pérdida de masa en laderas montañosas. Con ese propósito, se estudia las condiciones causantes de roturas superficiales en materiales morrénicos situados en vertientes con fuerte pendientes.

El trabajo experimental realizado ha consistido a poner a punta una columna de infiltración que permita determinar las propiedades de transferencia de agua en esos materiales. La columna consiste en un cilindro de metacrilato de 60 cm de altura y 30 cm de diámetro. Está equipada por 3 sensores de medida del contenido de agua del suelo (Decagon 10HS) y 2 de succión (Decagon MPS-2). La infiltración se realiza mediante el abastecimiento en agua desde la parte superior de la columna. Una caja de adquisición conectada a un ordenador permite obtener y guarda las medidas a una frecuencia determinada por el experimentalista.

Para diseñar el experimento, se realizó un cálculo numérico mediante un programa Elementos Finitos con el fin de evaluar los tiempos de respuesta y la posición óptima de los sensores, así como el tipo de drenaje de la columna. Para poder correr el programa se definieron características del modelo fundamentales como la geometría, condiciones de contorno e hidráulicas y se utilizaron los datos correspondientes a la curva de retención del proyecto mencionado anteriormente.

Finalmente, se realizaron ensayos de infiltración de prueba sobre un material arenoso previamente machacado y tamizado (diámetro máximo 1 cm). El material proviene de la Cuenca El Rebaixader, cerca de la población de Senet Alta Ribagorça, Lleida, actualmente estudiada en el marco de un proyecto de investigación. Debido a diversos procesos torrenciales, varios corrientes de derrubio se encuentran concentrados en una morrena lateral que con el tiempo ha constituido un escarpe de gran espesor.

Los resultados demuestran la capacidad del ensayo a reproducir el mecanismo de infiltración y los parámetros que lo controlan.

Abstract

The Master thesis focuses on the design, preparation and testing of an infiltration column to evaluate the hydraulic response of an unsaturated soil column.

This work is part of a more general issue on the evaluation of the effect of climate changing on the processes of mass wasting on mountain slopes. With this purpose, the conditions causing superficial breaks in till materials located in slopes with strong slopes are studied.

The experimental work has consisted of building a column of infiltration that allows determining the water transfer properties in these materials. The column consists of a methacrylate cylinder 60 cm high and 30 cm in diameter. It is equipped with 3 soil water content sensors (Decagon 10HS) and 2 suction sensors (Decagon MPS-2). The infiltration is performed by supplying water from the top of the column. An acquisition box connected to a computer allows obtaining and saving the measurements at a frequency determined by the experimentalist.

To design the experiment, a numerical calculation was carried out using a Finite Element program to evaluate the response times and the optimum position of the sensors, as well as the type of column drainage. In order to run the program, fundamental model characteristics such as geometry, contour and hydraulic conditions were defined and the data corresponding to the retention curve of the project mentioned above were used.

Finally, test infiltration tests were carried out on a sandy material previously crushed and sieved (maximum diameter 1 cm). The material comes from the El Rebaixader Basin, near the town of Senet Alta Ribagorça, Lleida, currently studied as part of a research project. Due to various torrential processes, several streams of debris are concentrated in a lateral moraine that over time has constituted a thick escarpment.

The results demonstrate the ability of the assay to reproduce the infiltration mechanism and the parameters controlling it.

Índice General

1.	<i>Introducción</i>	1
1.1	<i>Motivación y problemática general</i>	1
1.2	<i>Objetivos del estudio</i>	2
1.3	<i>Estructura del trabajo</i>	2
2.	<i>Contexto del trabajo</i>	4
2.1	<i>Depósitos glaciares (Tills)</i>	4
2.2	<i>Movimientos de masa</i>	6
2.3	<i>Clasificación de los movimientos de masa</i>	7
2.4	<i>La lluvia como causa de movimientos de masa</i>	10
2.5	<i>Ley de Darcy</i>	11
2.6	<i>La infiltración</i>	12
2.6.1	<i>Influencia de la infiltración en los taludes</i>	13
2.6.2	<i>Generalidades de la infiltración en la masa de suelo</i>	13
2.6.3	<i>Evapotranspiración y redistribución</i>	14
2.7	<i>Senet instrumentado</i>	15
3.	<i>Zona estudiada</i>	19
3.1	<i>Situación geográfica y climática</i>	19
3.2	<i>Situación geológica</i>	20
4.	<i>Diseño del ensayo de laboratorio</i>	22
4.1	<i>Material</i>	22
4.1.1	<i>Toma de muestra 1</i>	22
4.1.2	<i>Toma de muestra 2</i>	23
4.1.3	<i>Toma de muestra 3</i>	24
4.2	<i>Descripción de los sensores y softwares utilizados</i>	28
4.2.1	<i>Sensor de VWC 10HS</i>	28
4.2.2	<i>Sensor de succión MPS-2</i>	30
4.2.3	<i>Datalogger Cr10x</i>	32
4.2.4	<i>Multiplexor: Am16/32</i>	33
4.2.5	<i>Sondas de temperatura: T108</i>	34
4.2.6	<i>Pc 400</i>	34
4.3	<i>Descripción del ensayo</i>	36

4.3.1	Ensayo de columna de infiltración	36
4.3.2	Metodología de ensayo	36
4.3.3	Calibración sensor 10HS.....	39
5.	<i>Modelo predimensionamiento en Code_Bright</i>	44
5.1	<i>Criterios básicos de formulación</i>	45
5.2	<i>Ecuaciones de gobierno</i>	46
5.2.1	Ecuaciones de balance	47
5.2.2	Ecuaciones constitutivas	49
5.3	<i>Principales características de Code_Bright</i>	51
5.4	<i>Desarrollo del modelo en Code_Bright</i>	52
5.4.1	Geometría	52
5.4.2	Datos del problema.....	53
5.4.3	Materiales	56
5.4.4	Condiciones.....	57
5.4.5	Mallado	59
5.5	<i>Casos desarrollados en Code_Bright</i>	60
5.5.1	Conclusiones	64
6.	<i>Análisis de medidas arrojadas por sensores</i>	67
6.1	<i>Introducción</i>	67
6.2	<i>Resultados de los sensores</i>	68
6.2.1	Transformación de datos VWC sensor 10HS	69
6.2.2	Análisis de los datos	70
7.	Conclusiones.....	79
8.	Bibliografía.....	80
	<i>Anexos</i>	81

Índice de figuras

Figura 1. Tipos básicos de glaciares, catedra UPC.	4
Figura 2. Elementos morfológicos y morfométricos de un deslizamiento, González de Vallejo, 2002.	6
Figura 3. Clasificación de las diferentes tipologías de movimientos de masa (Corominas y García, 1996) ..	7
Figura 4. Esquema de circulación del agua en una ladera (González de Vallejo, 2002).	10
Figura 5. Ubicacion de los sensores instalados (Madrid, 2012).	15
Figura 6. Ubicacion del ultrasonido (Madrid, 2012).	16
Figura 7. Geófono instalado in situ (Madrid, 2012).	18
Figura 8. Ubicación de Senet con Google Maps.	19
Figura 9. Mapa topográfico de la zona de estudio (Instituto Cartográfico de Cataluña, ICC).	20
Figura 10. Mapa geológico (Instituto Cartográfico de Cataluña).	21
Figura 11. Curva granulométrica muestreo 1 (Madrid, 2012).	22
Figura 12. Ubicacion de los muestreos realizados (Madrid, 2012).	23
Figura 13. Curva granulométrica muestreo 2 (Madrid, 2012).	24
Figura 14. Ubicacion puntos de toma de muestras (Madrid, 2012).	25
Figura 15. Curva granulométrica para muestras del muestreo 3 (Madrid, 2012).	26
Figura 16. Curvas granulométricas de todas las muestras (Madrid, 2012).	26
Figura 17. Sensor de humedad, manual del usuario.	28
Figura 18. Sensor MPS-2, manual del usuario.	30
Figura 19. Datalogger CR10X, manual del usuario.	32
Figura 20. Interfaz del programa.	34
Figura 21. Preparación del suelo.	37
Figura 22. Colocación dentro del metacrilato.	38
Figura 23. Esquema del montaje de la columna de infiltracion.	39
Figura 24. Calibración del 10HS.	40
Figura 25. Grafica de aproximación lineal.	43
Figura 26. Comparacion entre la ecuación de Decagon y la aproximación lineal.	43
Figura 27. Representacion esquemática de un medio poroso no saturado (manual del usuario).	45
Figura 28. Datos generales en GID.	54
Figura 29. Ecuaciones a resolver en GID.	54
Figura 30. Estrategia de la solución en GID.	55
Figura 31. Frecuencia de escritura de resultados.	55
Figura 32. Materiales utilizado en GID.	57
Figura 33. Condiciones asignadas al material.	58
Figura 34. Condicion de flujo aplicada a la geometría.	58
Figura 35. Malla en Gid.	59
Figura 36. Grafica contenido de agua versus tiempo.	60
Figura 37. Curvas de retención de cada punto.	61
Figura 38. Grafica contenido de agua versus tiempo.	62
Figura 39. Curvas de retención para cada punto.	63
Figura 40. Grafica contenido de agua versus tiempo.	63
Figura 41. Curvas de retención para cada punto.	64

<i>Figura 42. Presiones intersticiales hasta alcanzar $P=0$ MPa.</i>	66
<i>Figura 43. Esquema real de la columna con sensores.</i>	67
<i>Figura 44. Esquema real de la columna con sensores.</i>	67
<i>Figura 45. Sensores de la columna conectados al datalogger.</i>	68
<i>Figura 46. Evolución del tiempo de infiltración a medida que se le va agregando agua.</i>	71
<i>Figura 47. Situación de la columna al 11 de Mayo.</i>	73
<i>Figura 48. VWC a los 10, 30 y 50 centímetros de profundidad medido desde la superficie y Succión a los 10 y 50 centímetros. Evento de lluvia artificial (representada por la flecha naranja.</i>	75
<i>Figura 49. Variación de la temperatura a lo largo del experimento.</i>	77
<i>Figura 50. VWS vs Temperaturas.</i>	77

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Clasificación simplificada de los movimientos de ladera modificada de Corominas y García (1997) con la terminología en inglés.</i>	9
Tabla 2. <i>Propiedades físicas del material de la zona de abanico (Madrid, 2012).</i>	22
Tabla 3. <i>Parámetros obtenidos por ensayo muestras TOP 1 y TOP 2 (Madrid, 2012).</i>	25
Tabla 4. <i>Coeficientes de permeabilidad Till supra-glaciar y TOP 1 (Madrid, 2012).</i>	25
Tabla 5. <i>Cuadro resumen para todas las muestras (Luna, 2015)</i>	27
Tabla 6. <i>Datos para montar columna.</i>	37
Tabla 7. <i>Calculo de los VWC de las diferentes muestras.</i>	41
Tabla 8. <i>Datos necesarios para el cálculo de los VWC.</i>	42
Tabla 9. <i>Errores con cada una de las ecuaciones.</i>	42
Tabla 11. <i>Datos proporcionados por los sensores.</i>	68
Tabla 12. <i>Datos del sensor 10HS sin transformar.</i>	69
Tabla 13. <i>Datos transformados.</i>	70
Tabla 14. <i>Información de lluvia ficticia 1.</i>	70
Tabla 15. <i>Infiltración del agua agregada.</i>	71
Tabla 16. <i>VWC a diferentes profundidades tomadas en el día 4 y 11 de Mayo.</i>	74

1. Introducción

1.1 Motivación y problemática general

Es de conocimiento general que el agua infiltrada en una obra, como lo es un talud, es uno de los principales factores que influyen en la inestabilidad de la misma y por consiguiente en los deslizamientos de tierra. La acción del agua infiltrada puede comprobarse por medio de varios mecanismos y en el caso específico de los taludes este efecto puede magnificarse a partir de la escorrentía que cae sobre los mismos y más si se trata de taludes con pendientes fuertes. Lo que frecuentemente se concluye acerca de cómo influye la infiltración sobre los taludes es que el agua satura al talud y la presión de poros aumenta induciendo a que falle.

Otro gran problema asociado con la infiltración de agua es la erosión ya que el desprendimiento, transporte y acumulación de partículas de suelo por parte del agua puede cambiar las características del relieve y los esfuerzos resultados de la activación de un deslizamiento.

Por este motivo desde la antigüedad se han realizado varios estudios y análisis relacionando lo que son el proceso de la infiltración con la estabilidad de taludes. Si se tienen medidas del agua que se infiltra puede convertirse en un indicador directo del riesgo de deslizamientos de tierra. Otro factor a tomar en cuenta para contrarrestar los efectos de la infiltración, es la capacidad de infiltración del talud que va a depender de su geometría y de la permeabilidad del terreno. Estaremos hablando de permeabilidades bajas del terreno cuando el suelo se encuentre totalmente disecado, es decir, sin grietas. A su vez, que tan rápido se sature el talud dependerá de la intensidad del agua aportada.

El área de estudio que se ha considerado en este trabajo de tesis es la cuenca del El Rebaixader, la cual es un área de montaña alta donde fenómenos torrenciales se dan a lugar frecuentemente, sub-anualmente para ser exactos. Se ubica en un área cercana a la población de Senet, en la comarca de la Alta Ribagorça y se encuentra dentro de la zona pirenaica.

La zona del Rebaixader está controlada por medio de monitores como geófonos, ultrasonidos, una cámara de video, estaciones meteorológicas y sensores, tanto para medir el contenido volumétrico del agua como para medir la succión. En este trabajo de tesis nos centramos en los sensores ya que el objetivo era que sirvieran como sistema de auscultación y alerta en la formación de movimientos de masas y de ver como el agua infiltrada afecta a la masa de suelo.

Lo primero que se hizo fue realizar un modelo en Code_Bright para predimensionar la columna de suelo, que posteriormente se utilizó en un ensayo de infiltración. Se obtuvieron otros datos de interés, como el caudal de infiltración, colocación de los sensores, etc., a través de la simulación de este modelo.

Luego se analizaron los registros de cada uno de los sensores así como la verificación de las respuestas de los mismos para así entender mejor e interpretar lo que ocurre en el talud.

1.2 Objetivos del estudio

El presente trabajo tiene los siguientes objetivos principales:

- 1) Estudiar los efectos que produce la infiltración en los suelos, pero especialmente en los taludes.
- 2) Mostrar los resultados arrojados por los sensores instalados en la columna de infiltración en un tiempo establecido.
- 3) Correr un modelo en Code_Bright, al cual se le apliquen condiciones de flujo y de contorno para así obtener el dimensionamiento para la columna de suelo utilizada en el ensayo de infiltración, así como el caudal de infiltración aportado y una frecuencia de lecturas adecuada.
- 4) En base a los resultados arrojados por este modelo, proponer un diseño de la columna de infiltración.
- 5) Tener un mejor conocimiento de la curva de retención del suelo.
- 6) Presentar la variación de la permeabilidad con la saturación de la masa de suelo.

1.3 Estructura del trabajo

El presente trabajo final de master consta de seis capítulos. En el primer capítulo, se resumen una serie de conceptos que están relacionados con el efecto de la lluvia o precipitación infiltrada en el suelo, aplicados a un suelo proveniente de la cuenca de El Rebaixader. Además, se habla del agua como factor desencadenante de movimientos de laderas y que otros posibles efectos tiene sobre los taludes.

En el capítulo dos, se presenta información importante sobre la zona que se esté estudiando, incluyendo lo que es su ubicación geográfica, la caracterización del material, etc. Para obtener estas informaciones se hizo uso de los datos brindados por estudios realizados anteriormente en el área de estudio, además de resultados ofrecidos por ensayos que se llevaron a cabo para la obtención de parámetros de interés, de los cuales algunos tuvieron que ser ajustados como es el caso de la curva de retención del suelo. Por otra parte se explica de forma detallada tanto el funcionamiento de cada uno de los sensores instalados

como su ubicación, tratándose especialmente los sensores de contenido volumétrico de agua y de succión ya que fueron los analizados en este trabajo.

Cabe destacar que para la utilización del sensor que mide contenido volumétrico de agua (Decagon 10HS) fue necesaria una calibración particular para el tipo de suelo que se estaba usando. Resultado de esta calibración se obtuvo una ecuación que se le aplicara a todas las lecturas ofrecidas por ese sensor.

En el capítulo tres, se explica en detalle cómo se desarrolla el modelo en Code_Bright, en el cual se simulan las condiciones de flujo y las características intrínsecas del suelo en un modelo de suelo. Se describen también su formulación numérica, las ecuaciones utilizadas, etc. Además se llegó, a las conclusiones pertinentes según los resultados arrojados por el programa para el diseño de la columna de suelo que sería utilizada en el ensayo de infiltración.

Por último, en los capítulos cuatro y cinco se mostró los resultados y su aplicación, así como la evolución en el tiempo de parámetros como la presión de agua y el contenido volumétrico de agua en el suelo. También se ajustaron los resultados para mejorar la respuesta del suelo frente al fenómeno de la infiltración.

2. Contexto del trabajo

2.1 Depósitos glaciares (Tills)

Mientras se desarrollaba la edad de hielo del Pleistoceno, grandes extensiones de la tierra estaban recubiertas por glaciares, los cuales con el paso del tiempo se transportaron. A medida que se transportaban iban arrastrando junto con ellos, grandes porciones de boleo, grava, arena, limo y arcilla. A la acumulación de sedimentos dejada por los glaciares se les llama derrubio mientras que al yacimiento de depósitos, que no se encuentra estratificado y yace debajo de los glaciares cuando se derriten, se les nombra tilita (till).

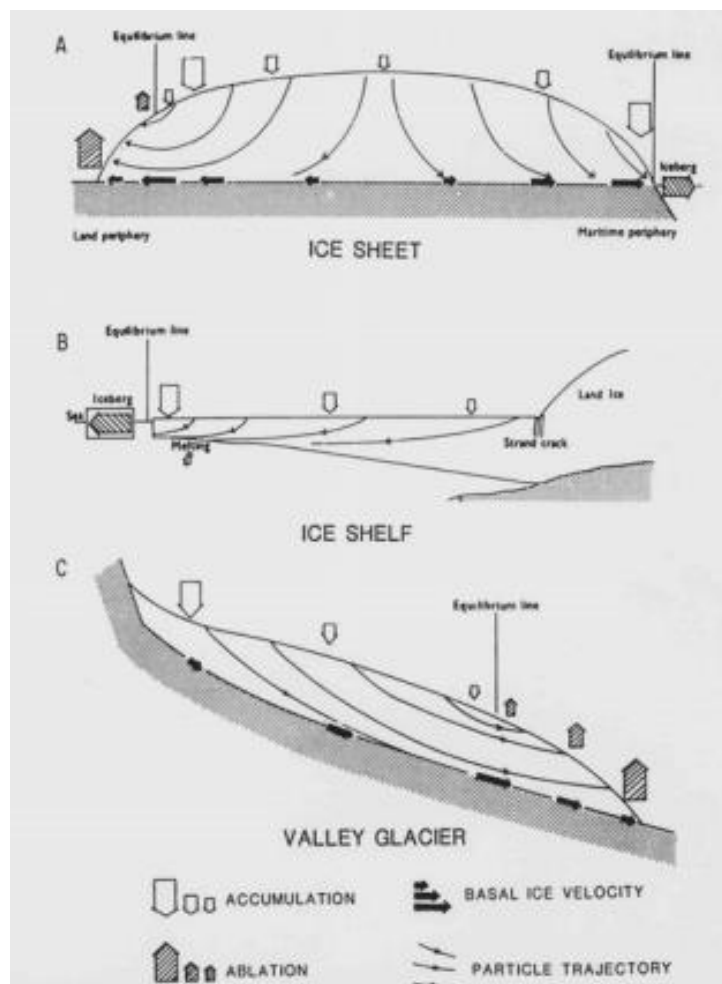


Figura 1. Tipos básicos de glaciares, catedra UPC Tema 6: procesos, formas y depósitos glaciares.

Los tills presentan un amplio rango de tamaños de granos y son depositados directamente por la acción del hielo glacial sin que las corrientes de agua intervengan.

De acuerdo a su mecanismo de formación los tills se pueden dividir en tres tipos:

1. Till de flujo (flow till): depositado por la acción de un gran flujo de material saturado en agua que escurre sobre la cara superficial del glaciar.
2. Till de acreción: grupo de sedimentos blandos que se transporta en masa debajo de la base del glaciar. Este material es depositado contra obstáculos del estrato o más bien, contra piezas de hielo que no se encuentra en movimiento.
3. Till de fusión: estos sedimentos son transportados ya sea dentro del glaciar o sobre su superficie y es depositado cuando el hielo se funde. Esto puede ocurrir en la base del glaciar o en su superficie.

Según la posición de los tills con respecto al glaciar, se pueden clasificar:

1. Tills supraglaciales, estos pueden ser de flujo o de fusión.
2. Tills subglaciales, estos pueden ser de cualquier tipo.

Sin importar cuál sea el origen de los depósitos glaciales, estos suelen estar bastante deformados, pero en especial los tills subglaciales. Esto se debe a que durante el proceso de transportación y deposición, el material de este tipo está sometido continuamente a esfuerzos de corte y a que se ha remoldado por la deformación.

Las morrenas se refieren a las formas de cualquier depósito de origen glacial, indistintamente de cuales sean las características y morfología del depósito. Se clasifican de acuerdo a varios criterios.

Según sea su posición con respecto al glaciar:

1. Morrena basal, que es la que se refiere a materiales subglaciales.
2. Morrenas frontales, laterales y centrales, corresponden con materiales supraglaciales.

Según sea su forma:

1. En manto o morrenas alargadas.

Según sea su orientación en cuanto al flujo glacial:

1. Transversales
2. Longitudinales.

Según sea su mecanismo de acumulación:

1. Volcadas desde el glaciar.
2. De empuje.

2.2 Movimientos de masa

Estos se definen como masas de suelo o rocas desplazadas, cuya principal causa es el exceso de agua en el terreno y a consecuencia del efecto de la gravedad.

Este tipo de procesos son esencialmente gravitatorios. Es por esto que una gran porción de la masa de suelo se mueve a una cota inferior desde la de origen sin necesidad de que algún medio de transporte tenga que intervenir en el desplazamiento, ya que solo hace falta, para que se produzca el movimiento, que las fuerzas estabilizadoras sean menores que las desestabilizadoras. Los procesos en los que la gravedad juega un papel importante, están interrelacionados con las precipitaciones altas, por lo que con frecuencia las lluvias torrenciales son las principales causantes de los movimientos de masa. Esto se debe a que cuando precipita agua sobre el terreno las fuerzas desestabilizadoras y la resistencia al deslizamiento se reduce (Gray y Sotir, 1996; Tragsatec, 1994).

Es por esta razón, que ya sea por su magnitud y frecuencia, los movimientos de masas simbolizan un peligro geológico considerable ya que entre sus consecuencias pueden citarse danos materiales en edificaciones e infraestructuras, así como la posible pérdida de vidas humanas.

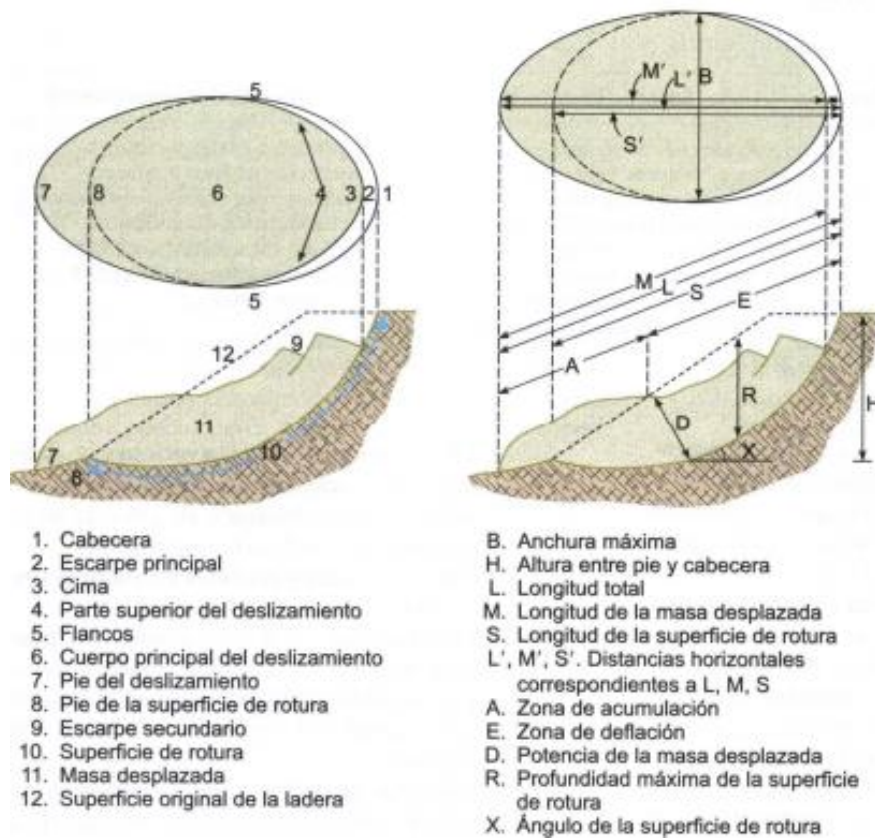


Figura 2. Elementos morfológicos y morfométricos de un deslizamiento, González de Vallejo, 2002.

2.3 Clasificación de los movimientos de masa

De acuerdo con los mecanismos de rotura y las características de los materiales presentes existen varias clasificaciones de deslizamientos (Varnes, 1984; Hutchinson, 1988; WP/WLI, 1993; Cruden y Varnes, 1996). Corominas y García (1997) propusieron una clasificación que es la utilizada en el presente trabajo. Esta clasificación está basada en las que se mencionaron anteriormente con excepción de que los autores definen como deformaciones sin rotura o previas a esta.








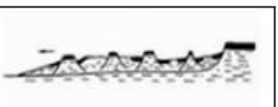
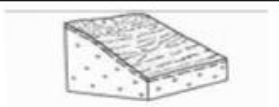







I Movimientos en los que predomina la trayectoria vertical	 Desprendimientos	 Colapsos
II Movimientos de giro de determinados bloques por fracturación vertical	 Vuelco por flexión	 Vuelco por desplome
III Movimientos de grandes bloques al iniciarse la rotura	 Deslizamiento traslacional	 Deslizamiento rotacional
IV Movimientos con extrusión plástica lateral	 Fluencia	 Licuefacción
V Movimientos de una masa desorganizada, flujos.	 Reptación	 Colada de tierra
	 Solifluxión	 Corriente de derrubios
	 Golpes de arena y limo	 Aludes
VI Otros movimientos	 Deformaciones gravitacionales profundas	 Roturas confinadas

Figura 3. Clasificación de las diferentes tipologías de movimientos de masa (Corominas y García, 1996)

Los mecanismos de rotura son el criterio básico que permiten identificar los diferentes tipos de deslizamientos en la mayor parte de sus clasificaciones. Los mecanismos de rotura principales se pueden clasificar en cinco tipos (Corominas, 1989):

- ✓ Vuelcos
- ✓ Caídas o desprendimientos
- ✓ Deslizamientos
- ✓ Expansiones laterales
- ✓ Flujos

Cuando se habla de mecanismos, existe otro tipo de deformaciones (Corominas y García, 1997). Estas son las deformaciones sin que ocurra la rotura o previas a la rotura de las laderas y los movimientos complejos.

Desde otro punto de vista, los vuelcos son movimientos de rotación dirigiéndose hacia el exterior de una unidad o de conjunto de bloques alrededor de un eje pivotante situado por debajo del centro de gravedad de la masa movida (Luna, 2015).

Se define como desprendimiento caída al movimiento de una parte de suelo o roca, como bloques aislados o ya sea masivamente y en gran parte de su recorrido desciende por el aire en caída libre, donde vuelve a entrar en contacto con el terreno, donde se producen saltos, rebotes y rodaduras (Corominas, 1989).

Acercas de los deslizamientos se definen como movimientos descendentes, se podría decir rápidos, de una masa de suelo o roca que se encuentra a lo largo de una superficie o varias que se definen que pueden ser visibles o sean más bien deducidas según el conocimiento que se tenga acerca de estas o tratarse de franjas relativamente estrechas. Se piensa que toda la masa que se movilice se desplazará funcionando como un bloque único y dependiendo de la trayectoria que describa se pueden clasificar los deslizamientos como rotacionales o traslacionales.

Tratándose de las expansiones laterales predomina el movimiento de la extrusión plástica lateral, en el cual se acomodan fracturas de cizalla o más bien de tracción, pero a veces estas pueden resultar de localizar.

Por último están los flujos, que se definen como movimientos de una masa sin orden alguno o más bien mezclada, en la cual las partículas de su composición no se desplazan a la misma velocidad necesariamente ni tampoco sus trayectorias tienen que ser paralelas. Es por esta razón que la masa movilizadad no conserva su forma en el movimiento descendente y a menudo adopta morfologías en forma de lóbulos.

Tabla 1. Clasificación simplificada de los movimientos de ladera modificada de Corominas y García (1997) con la terminología en inglés.

TIPO DE MECANISMO	SUBTIPO	TIPO DE DESLIZAMIENTO	(INGLÉS)
Movimientos donde predomina la trayectoria vertical		Desprendimientos o caídas	Falls
Movimientos de giro de bloques determinados por la fracturación en escarpes		Vuelcos	Topples
Movimientos de grandes bloques al iniciarse la rotura	Superficies de desplazamientos planas o asimilables a ellas	Resbalamientos o deslizamientos, Desplazamientos concordantes, Desplazamientos discordantes	Slides
	Desplazamientos sobre superficies curvadas	Deslizamiento rotacional	Rotational slides
Movimientos de una masa desorganizada	Flujos	Reptación, Coladas de tierra Solifluxión, Corrientes de derrubios Golpes de arena y limo, Flujos de roca, Avalanchas	Creep, Earthflows, Solifluction, Debris flows, Sand and silt flows, Rock flows, Avalanches
Movimientos con extrusión plástica		Expansión lateral	Lateral spreading
Otros movimientos	Deformaciones sin rotura o previas a la rotura	Reptación por fluencia, Cabeceo de estratos, Combadura, Pandeo en valle, Deformaciones gravitacionales profundas, Rotura confinada	Flexural toppling, Cambering, Bulging, Sagging, Confined failure
	Movimientos complejos	Colapso de volcanes Flujos deslizantes	Flow slides

2.4 La lluvia como causa de movimientos de masa

Existe una relación fundamental entre los desencadenamientos de movimientos de ladera a consecuencia de causas climáticas y meteorológicas y la intensidad, el volumen y los patrones distributivos de las precipitaciones y el régimen climático. Es por esta razón, que debe tomarse en cuenta cómo responde el terreno frente a fenómenos de precipitaciones intensas con duración horaria (tormentas) o diaria, y como responde durante las estaciones (épocas secas y con lluvias a lo largo del año) o plurianuales (con ciclos secos y húmedos).

El agua en el terreno da lugar a presiones que alteran los estados tensionales, por presiones intersticiales y aumento del peso, a procesos de erosión interna y externa y a cambios mineralógicos, aspectos todos ellos que modifican las propiedades y resistencia de los materiales, sobre todo en los suelos (González de Vallejo, 2002).

La infiltración del agua de lluvia como se observa en la Ilustración 6, produce flujos superficiales y subterráneos en las laderas, provocando un aumento en el contenido de agua de la zona no saturada y una elevación del nivel freático, lo que condiciona la recarga de la zona saturada incrementando las presiones intersticiales y la consecuente pérdida de resistencia del material. Esto explica el desencadenamiento de movimientos de masa (González de Vallejo, 2002).

Además, se debe tener en cuenta que la capacidad de infiltración y la movilización de materiales depende de la intensidad y duración del episodio de lluvia, del tamaño de la cuenca, del contenido previo de agua en el terreno, de su permeabilidad y capacidad de transmitir, de la topografía, de la presencia o la ausencia de vegetación en la ladera, así como de la existencia de materiales sueltos y la posible generación previa de inestabilidades (González de Vallejo, 2002).

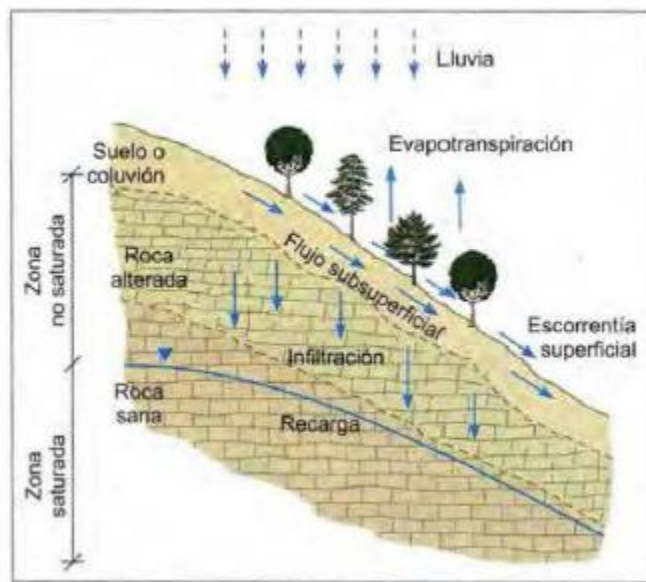


Figura 4. Esquema de circulación del agua en una ladera (González de Vallejo, 2002).

2.5 Ley de Darcy

La ley de Darcy es el fundamento básico que define el movimiento de agua a través de un acuífero. Esta establece que el flujo a través de un medio poroso es proporcional a la conductividad hidráulica, a la pérdida de carga y a la sección considerada. Esta ley está definida por la siguiente ecuación:

$$Q = k \cdot S \cdot h/L$$

Donde,

Q= caudal de agua.

k= conductividad hidráulica, lo que se traduce como la medición de la capacidad de un medio poroso para transmitir agua.

S= es la sección del flujo.

h/L = se refiere a la pérdida de carga.

Pero actualmente la ley de Darcy se expresa de la siguiente manera:

$$q = -k \cdot \frac{dh}{dl}$$

Donde,

$q = Q/S$, es decir se refiere al caudal que circula por m^2 de sección.

k= como se había mencionado antes es la conductividad hidráulica. El signo negativo se debe a que el caudal es una magnitud vectorial y su dirección es hacia los dh que van decreciendo, ósea que dh es de signo negativo y, por tanto, el q será positivo al final.

Existen algunas limitaciones en cuanto a la Ley de Darcy, que la hacen ser no tan precisa. Esto se debe a que:

1. Lak, constante de proporcionalidad, no resulta ser una característica propia del medio poroso sino que también esta depende del fluido. Así que en esta constante hay que hacer un ajuste tomando en cuenta al fluido. Sin embargo, aunque se tiene conocimiento de esto, también se sabe que la influencia del fluido sobre k generalmente es despreciable. Es por esto que en la práctica en aguas subterráneas se considera solo la influencia del medio poroso.
2. En algunos casos, existe una relación no lineal entre el caudal y el gradiente hidráulico. Este tipo de situaciones ocurre cuando el valor de k resulta ser muy bajo o cuando hay altas velocidades del flujo.

2.6 La infiltración

El agua que precipita sobre un terreno se infiltrará hasta saturar su masa, haciendo que el agua que ya existía anteriormente se movilice por los poros del suelo lo que resulta en la formación de un frente húmedo de infiltración y en la generación de presiones dentro de la masa de suelo.

Se entiende por infiltración al proceso que involucra el movimiento del agua, a través de los poros intersticiales y discontinuidades del suelo, desde la zona superficial del terreno hacia la masa terrea. La infiltración puede dividirse a su vez en dos partes que corresponden a la parte que tiende a aportar agua en la zona del suelo que se encuentra seca o no saturada y la otra parte que aumenta el contenido de agua en la zona saturada.

Cuando empieza a precipitar sobre el terreno el agua lluvia se infiltra humedeciendo el suelo. Anteriormente al proceso de infiltración, en el suelo ya existía una cierta humedad y será concluyente para determinar la cantidad de agua que se infiltrará ya que cuando precipita al agua que humedece el suelo forma un manto delgado de saturación y a fin de que se formen corrientes de infiltración y de escorrentía este manto debe llegar a un estado de estabilización.

La estabilización de la capa de saturación consiste en alcanzar el estado en el que todo el perfil transfiera agua a la tasa máxima de infiltración permitida por medio de los límites menos permeables.

La parte de agua que no puede infiltrarse en el suelo se queda en la cara superficial del terreno. Con esta agua se formarán varias corrientes: una que escurrirá por el terreno y un conjunto de corrientes subterráneas que serán más o menos paralelas a la pendiente del terreno. Estas corrientes estarán en función del tipo de precipitación, las propiedades físicas del terreno y del proceso de infiltración.

Existen varios factores que determinarán la cantidad de agua que se infiltrará en la masa terrea. Entre los más relevantes se pueden mencionar:

- 1) La precipitación es el primer factor a tenerse en consideración: tipo de lluvia, la cantidad que cae y la intensidad de la misma.
- 2) Es importante para el tema en cuestión con qué rapidez cae la precipitación sobre el terreno, es decir, si llueve rápidamente se le hará al terreno más difícil saturarse ya que la superficie es la que recibe más agua y por ende menos penetra. Mientras más lenta es la precipitación más agua infiltra y menos fluirá superficialmente.
- 3) La pendiente del terreno juega un papel muy importante ya que mientras menos pendientes se tiene (terrenos planos) más agua infiltrada habrá.
- 4) Las características físicas e intrínsecas del material de suelo que conforma el talud van a definir el proceso de la infiltración que dependa de la succión y permeabilidad del suelo. Además de la

estratigrafía del terreno, más específicamente lo que se refiere a su estructura, fracturación y posición de las capas permeables e impermeables.

5) La succión y permeabilidad del suelo.

6) La vegetación y que cantidad exista en el terreno influye en cuanta agua se infiltre en el suelo.

El grado de dificultad con que un talud pueda drenar el agua en caso de saturación va a depender de las formaciones geológicas periféricas y si existen estratos permeables para drenar el agua la estabilidad se alcanza más rápidamente.

2.6.1 Influencia de la infiltración en los taludes

En el momento que el agua se infiltra en el terreno y se cuela en el subsuelo por medio de las grietas y poros se crea una corriente determinada y una saturación que varía de acuerdo a varios factores. Como idea general se puede tener que el agua sirve como una especie de lubricante sobre los granos y discontinuidades del suelo creando un estado de inestabilidad del talud que puede resultar en un deslizamiento.

No obstante es cierto que el agua lubrica las partículas del suelo, la inestabilidad en el talud es causada primordialmente por el peso adicional que se le suma al suelo resultado del agua que se infiltro y ahora ocupa, los anteriormente vacíos, poros y grietas. Otra de las consecuencias de que se infiltre mucha agua en el terreno es que esta crea un gran campo de presiones internas intersticiales.

Cuando se tiene un suelo saturado se tienen dos componentes, las partículas sólidas del suelo y agua. Estos dos elementos asumen los esfuerzos que reciben en formas distintas. El agua no admite esfuerzos cortantes por lo cual las tensiones efectivas tienden a disminuir y los esfuerzos cortantes a aumentar siendo asumidos por la parte solida de la composición del suelo saturado. Lo antes descrito tiene mayor relevancia si existe capas permeables e impermeables alternadas una sobre la otra, porque donde existe la condición de permeabilidad se desarrollan presiones internas de gran magnitud.

2.6.2 Generalidades de la infiltración en la masa de suelo

En el siguiente apartado se explicaran algunos conceptos relacionados con el tema que se desarrolla en este trabajo de tesis, siendo útiles para el entendimiento del mismo.

La infiltración

Existen dos conceptos de suma importancia si se quiere explicar lo que es la infiltración del agua en el terreno:

- ✓ La infiltración que se acumula: esta representa la cantidad total de agua que se ha infiltrado en el suelo a una cierta profundidad o en un periodo de tiempo determinado y cuya ecuación de cálculo es la siguiente:

A una profundidad determinada

$$I = \int_0^{Z_f} \Delta\theta dz$$

En un tiempo determinado

$$I = \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt$$

Donde,

Z_f = profundidad del frente de humedad.

$\Delta\theta$ = diferentes contenidos de humedad a lo largo de la profundidad.

t_1 y t_2 = tiempo inicial y final del proceso de infiltración.

En el caso de que se acumule menos infiltración que la cantidad de precipitación, resultara en un exceso de agua en la estructura. Esta cantidad de agua que excede se convertirá en escorrentía superficial.

- ✓ Capacidad de infiltración del terreno: este factor depende directamente de la conductividad hidráulica que posee la superficie del suelo, la cual a su vez está afectada por el contenido de humedad del suelo, su estructura, textura y la presencia de arcillas. Frecuentemente el momento en el cual la capacidad de infiltración del terreno es mayor es en las primeras etapas del fenómeno de lluvia y es menor hasta que alcanza un estado estacionario.

2.6.3 Evapotranspiración y redistribución

La evapotranspiración se define como el proceso mediante el cual se generan más pérdidas de agua en los suelos. En este proceso se combinan la transpiración de la vegetación y la evaporación de la superficie del terreno. Resulta casi imposible, dividir estos dos fenómenos ya que vienen en combinación y son prácticamente un solo.

Los factores de los que depende la evapotranspiración son la velocidad del viento, la magnitud del gradiente del vapor que se genera entre la superficie del suelo y la atmósfera, en el caso de que el aire

este más seco que el suelo ocurrirá que las moléculas de agua se dispersaran en la atmosfera, y la resistencia que presentan las moléculas de agua frente a su transporte a través de la masa de suelo.

Para calcular la evapotranspiración existen diferentes métodos, los cuales tienen las mismas bases fundamentales: incluyen balances de energía, transferencia de masa, balance de agua y ninguno separa los procesos de la transpiración con el de evaporación.

El proceso de la redistribución del agua comienza cuando cae la precipitación sobre la superficie del terreno. Aquí los procesos gravitacionales y capilares son muy importantes.

2.7 Senet instrumentado

En la zona se pueden encontrar varios tipos de sensores que a su vez están conectados a un registrador de datos llamado datalogger. Existen tres tipos de sensores que son:

1. Estaciones meteorológicas, con pluviómetro y sonda de temperatura. En la zona solo existe una.
2. Sensores de ultrasonido y geófonos, cuya función es medir la dinámica de corrientes de derrubio o de los movimientos de masas de tierra. En la zona hay 5 geófonos.
3. Cámaras de video, que registra y almacena en forma de video muestras visuales al momento de que ocurre una corriente de derrubios (Debris flow). Solo hay una cámara.
4. Luces infrarrojas.



Figura 5. Ubicacion de los sensores instalados (Madrid, 2012).

Estos aparatos están ubicados estratégicamente en la zona. Los sensores de ultrasonidos y los geófonos están posicionados a lo largo del canal principal, ya que por allí pasara mayor cantidad de material y la estación meteorológica está colocada en un lugar con elevación y sin mucha vegetación.

✓ Estación meteorológica

Esta incluye un sensor de temperatura y un pluviómetro. El modelo del sensor de temperatura es Beta Therm 10K3A1 de CAMPBELL SCIENTIFIC y su función es calibrar y corregir los datos proporcionados por los sensores de ultrasonido, para así determinar si la ha precipitado en la zona en forma de lluvia o de nieve. El pluviómetro es un RM YOUNG y tiene una resolución de 0.1 milímetros. Este consta de un recipiente que recibe el agua que entra a través del embudo y que va hacia el colector. El agua se acumula en el colector y es posible medir el líquido acumulado por medio de una regla graduada o si no bien por el peso del agua depositada.

En cuanto a la medición de la intensidad de lluvia, para su cálculo se utiliza un balancín que oscila a volumen constante de agua caída, registrándose eléctricamente el dato.

✓ Sensores de ultrasonido

Este sensor es un UC6000-30GM-IUR2-V15 de Pepperl and Fuchs y se ubica en la zona ligeramente por encima del estrato rocoso y esta sujetado por cables de acero que la ayudan a mantenerse en la posición donde fueron colocados.



Figura 6. Ubicación del ultrasonido (Madrid, 2012).

Estos sensores generan ondas acústicas mecánicas con una alta frecuencia y analizan el eco que rebota desde el objeto que se mide hasta el aparato.

El mecanismo de funcionamiento de estos sensores es el siguiente: calculan el intervalo de tiempo que conlleva el proceso que abarca desde que se generan las ondas y se emita una señal, hasta que esta se devuelva luego de haber rebotado en el objeto de medición. De esta forma se puede conocer cuanta distancia hay desde el objeto hasta el sensor.

Cuando se habla de objeto de medición se refiere a la masa de suelo que se acumula en el canal.

Un factor determinante en cuanto a la velocidad de las ondas acústicas a través del aire es la temperatura de la zona. Por esta razón, al momento de tomar las lecturas del sensor habrá que corregirlas tomando en cuanto a la temperatura.

Gracias a este sensor se puede obtener información como por ejemplo, el calado de la corriente de derrubios así como el material que se moviliza durante el fenómeno.

✓ Geófonos

Estos sensores son del tipo GEOSPACE 20DX cuya frecuencia natural es de 8 Hz y su constante de amortiguación es de 395 ohmios.

La función de estos sensores es la de registrar la vibración del suelo producida por alguna fuente de energía, en este caso este tipo de fenómeno energético se refiere a una corriente de derrubios o a una avenida torrencial.

Los geófonos sirven para convertir la vibración de la masa de suelo en un dato que el datalogger pueda leer, en este caso se convierte en una señal eléctrica. Con el fin de simplificar el analizar y almacenar los datos que recibe el datalogger, se hace uso de una placa electrónica conectada entre el geófono y el datalogger para convertir las vibraciones de las masas de suelo en números de impulsos por decimal de segundo (IMP/seg).

Estos sensores serán los que darán aviso al momento de formarse el debris flow, su intensidad y velocidad.

La mayoría de los geófonos están amarrados a una caja metálica rígida, la cual a su vez está anclada a la capa rocosa. Previendo fenómenos como precipitaciones, se procedió a cubrir la caja metálica con un caparazón de plástico, evitando que exista contacto entre las mismas. Si las gotas de lluvia llegan a impactar en la caja metálica provocarían vibraciones lo que se podría interpretar como un dato por el aparato. No obstante este tipo de problemas no se soluciona del todo con la envoltura de plástico.

Uno de los geófonos está anclado directamente al sustrato rocoso. Posteriormente al analizar los resultados proporcionados por cada uno de los sensores, se llegó a la conclusión de que el que estaba

anclado a la roca resulto ser más eficiente que los otros, ya que sus resultados no estaban influenciados por fenómenos como las gotas de lluvia impactando la caja plástica.

Por esta razón se recomienda que en análisis posteriores se anclen los geófonos a la capa rocosa y así evitar problemas de este tipo.



Figura 7. Geófono instalado in situ (Madrid, 2012).

✓ Cámara de video

El modelo de la cámara es un MX-M12D-Sec-DNight-D43N43. Diariamente al medio día se toma una fotografía de la zona y solo si se activase el modo event on, que ocurre cuando tiene a lugar un fenómeno de movimiento de tierras, se realiza un video durante el evento.

La locación de la cámara es en árbol, esto se debe a que desde allí se tiene una buena perspectiva y se puede apreciar claramente el proceso de los Debris Flows. Está colocada a la derecha del canal del barranco y a contrapendiente.

✓ Luz infrarroja

Estas están colocadas por encima de la cámara. Se colocaron cerca de la cámara por si el fenómeno se llegase a producir sin la presencia de la luz solar, las luces infrarrojas servirían para aportar luz a la zona y que de este forma la cámara puede grabar un video claro.

La energía que alimenta las luces infrarrojas proviene de una placa solar que consta de 10 Watts.

3. Zona estudiada

3.1 Situación geográfica y climática

El Rebaixader se localiza en el municipio de Vilaller, la cual se encuentre en la comarca de Alta Ribagorça, Lleida. Para acceder a esta zona se hace por la N -230 Lleida-Vielha.

El Rebaixader secunda de la Noguera Ribagorzana, afluente del río Segre. Esta constituye una cuenca principal que pertenece a la cuenca del Ebro y tiene una superficie de 0.7 km² cuya orientación es hacia el Oeste. La altitud máxima de la cuenca es de 2475 m.

La cuenca del Rebaixader es parte del subgrupo climático Pirenaico Occidental, según la división climatológica de Cataluña. Los registros de lluvia cada año muestran que la precipitación anual es de 1000m y 1300m, y es máxima durante el periodo cuando el clima es más cálido y mínima en invierno. La temperatura media anual se sitúa entre los 2 y 9 °C, con una oscilación anual de entre 13 y 16 °C. Se encuentra nieve en las zonas más elevadas de la cuenca, en el periodo que comprende los meses de noviembre hasta abril.

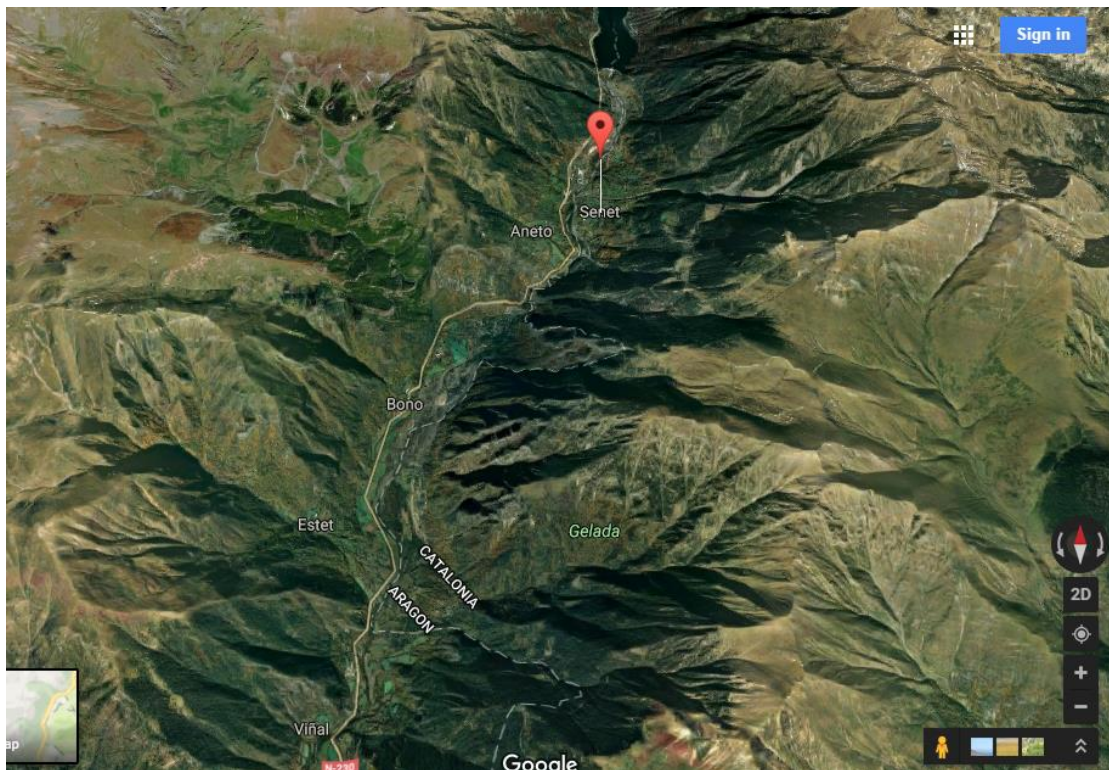


Figura 8. Ubicación de Senet con Google Maps.

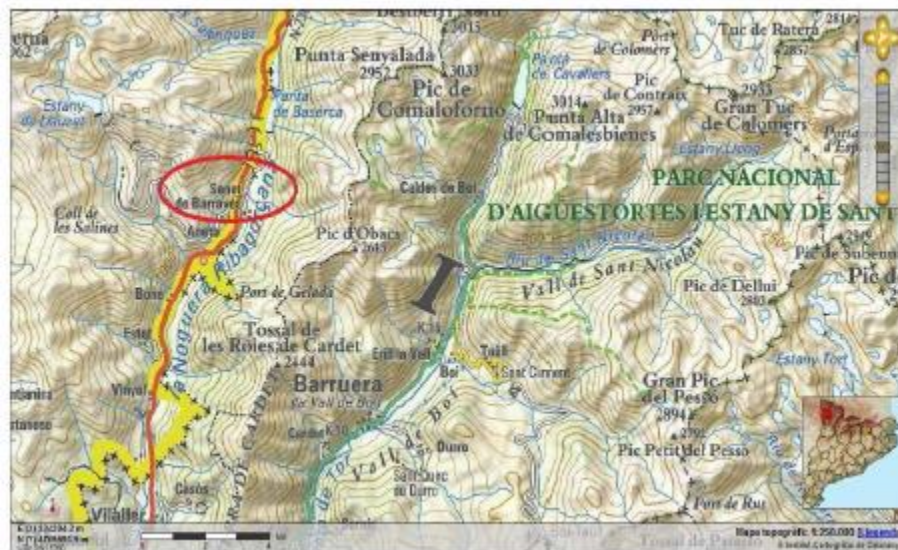


Figura 9. Mapa topográfico de la zona de estudio (Instituto Cartográfico de Cataluña, ICC).

3.2 Situación geológica

La localización del Rebaixader es en la parte axial pirenaica y es en este lugar donde están presentes lo que son rocas ígneas y metamórficas de edad paleozoica.

La capa de suelo rocosa está conformada, en gran parte, por rocas sedimentarias y metasedimentarias del Devónico, las cuales se encuentran deformadas mediante la orogénesis Herciniana y Alpina. Las foliaciones y esquistosidades se presentan como principales estructuras a menor escala y pliegues y cabalgamientos como estructuras a gran escala. Esto se debe a la actividad tectónica lo que hace que se deformen los diferentes sustratos del suelo.

En el sustrato rocoso la litología que se presenta está compuesta de pizarras y filitas.

Los sedimentos glaciares o till corresponden lo que es la formación superficial. El till es procedente del antiguo glaciar llamado Noguera Ribagorçana. Durante la última glaciación esta antiguo glaciar mostraba un espesor de hielo de unos 500 m. el Pleistoceno Superior es el grupo de los sedimentos glaciares que ha sido afectado y modificado por la acción de los movimientos de masa. Ya que los tills resultan ser un tipo de depósito formado por los glaciares, acontece que a medida que se van desplazando van depositando material ya sea lateralmente o en el frente. El material de estos depósitos suele ser no presentarse consolidados. Más bien el till está conformado por bloques morrenicos de granito.

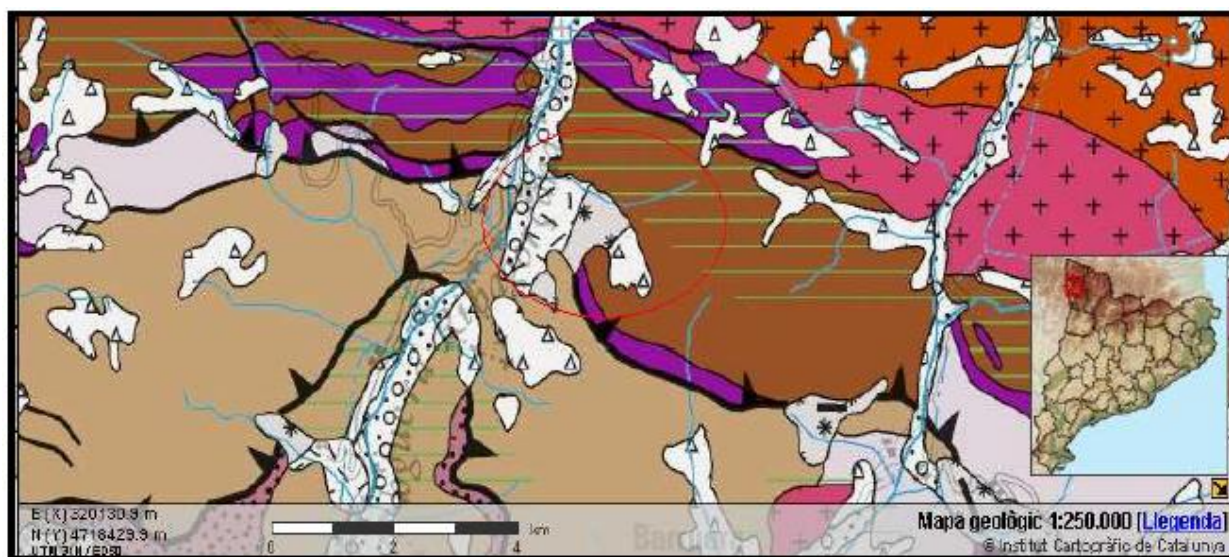
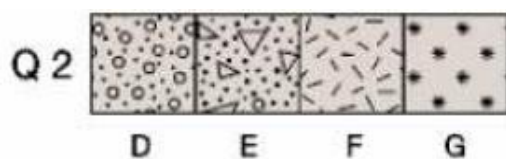


Figura 10. Mapa geològic (Institut Cartogràfic de Catalunya).

Pleistoceno medio y superior



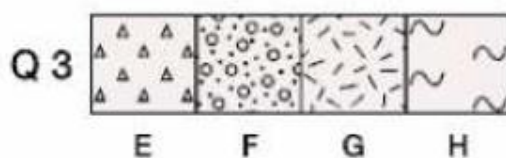
D= Gravas

E= Arcillas y cantos

F= Congelados, areniscas y lutitas

G= Bloques y arcillas

Holoceno



E= Limos y cantos

F= Cantos y limos (fondo valle)

G= Gravas, areniscas y lutitas

H= Lutitas, arenas y gravas dispersas

4. Diseño del ensayo de laboratorio

4.1 Material

Con datos obtenidos anteriormente, se recopiló información de gran importancia para poder correr el modelo en Code_Bright. Se obtuvieron parámetros y características del material que se introdujeron en el programa para su correcto desarrollo.

Se hicieron tres muestreos en la zona, los cuales se describen a continuación.

4.1.1 Toma de muestra 1

Básicamente el material estaba compuesto por suelo proveniente de proyectos anteriores. El primer muestreo se formó con material sobrante de una toma de muestra en campo de la zona del abanico y del escarpe realizado en abril del 2010. Las dificultades que se presentaron en ese entonces, permitieron que solo se obtuviesen las propiedades físicas del material de la zona del abanico.

Tabla 2. Propiedades físicas del material de la zona de abanico (Madrid, 2012).

Propiedad física	Valor
Peso natural (g)	1040
Peso seco (g)	919
Volumen de la muestra (cm ³)	500
Densidad natural (g/cm ³)	2.08
Densidad seca (g/cm ³)	1.84
Humedad (%)	13.2

La curva granulométrica correspondiente fue la siguiente:

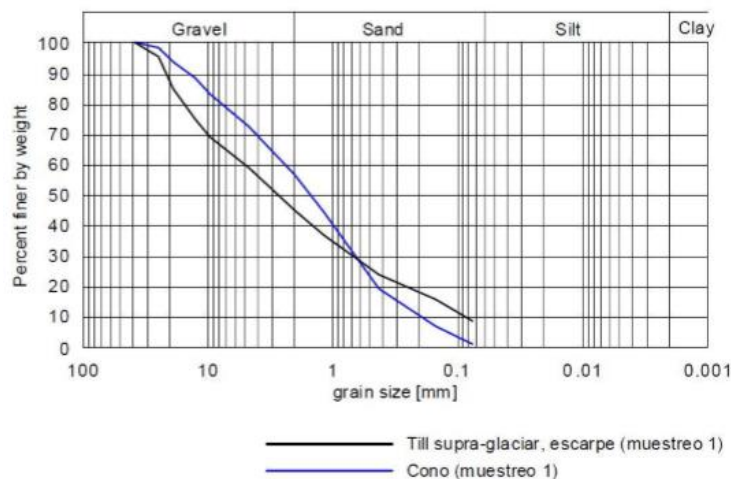


Figura 11. Curva granulométrica muestreo 1 (Madrid, 2012).

4.1.2 Toma de muestra 2

El Muestreo 2 se realizó el 21 y 22 de noviembre de 2011. El peso total que se logró recaudar de este material fue de 20 kilogramos de suelo, recolectado básicamente de la zona del escarpe, el cual correspondía al till sub-glaciar.

Una parte del material colectado fue utilizado para calcular los diferentes parámetros y propiedades físicas de la muestra y la otra parte restante se usó para calibrar varios sensores utilizados en el laboratorio de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Se tomaron tres muestras colectadas en recipientes con volúmenes distintos y luego se procedió a almacenarlas en bolsas plásticas para que de esta forma pudiesen mantener la humedad que tenían al momento de ser recolectadas en el campo.

En el lugar de la toma de las muestras se podía observar claramente a qué tipo de till correspondía el tipo de material que se estaba recolectando, ya que el color entre ambos era bastante de diferente. El till supra- glacial corresponde a un material más marrón terroso y en cambio el sub-glacial es grisáceo.



Figura 12. Ubicacion de los muestreos realizados (Madrid, 2012).

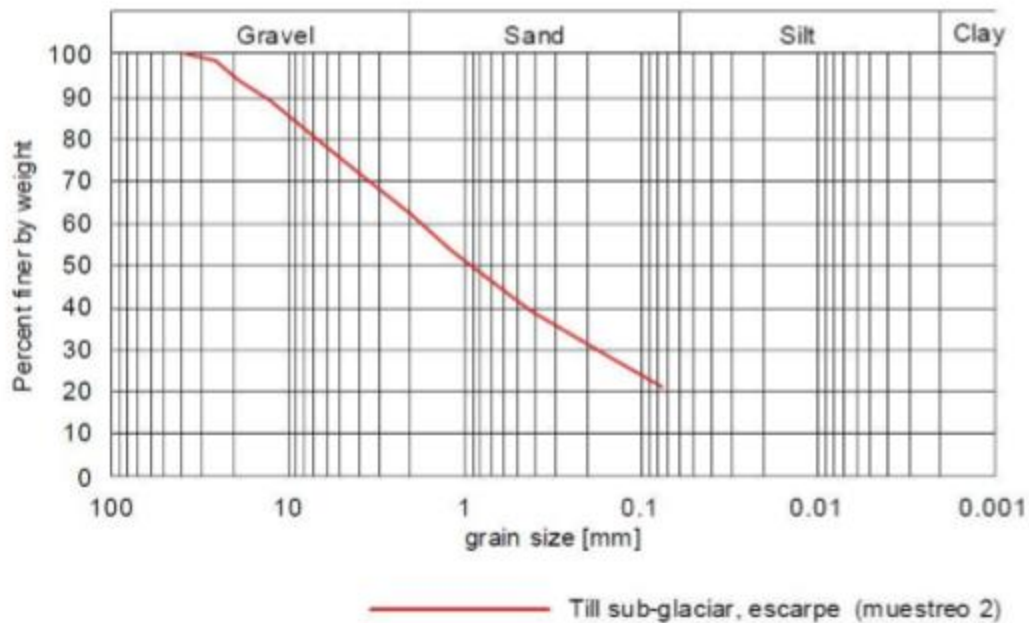


Figura 13. Curva granulométrica muestreo 2 (Madrid, 2012).

4.1.3 Toma de muestra 3

Se recolectaron 6 tomas de muestras con ubicaciones diferentes durante tres días de enero del 2012. Se nombraron de la siguiente forma:

1. TOP, donde se tomaron 3 muestras.
2. Till supra-glaciario, correspondiente a una muestra.
3. Canal, una muestra.
4. Abanico, una muestra.

En el TOP se recolectaron 3 muestras de suelo ubicadas en el mismo lugar pero con profundidades diferentes. El TOP 1 correspondió a una profundidad de 0-15 cm, el TOP 2 de 15-40 cm y el TOP 3 de 50-75 cm.



Figura 14. Ubicacion puntos de toma de muestras (Madrid, 2012).

En las zonas de TOP 1 y TOP 2 se llevó a cabo el ensayo in situ, **Método de la arena para calcular la densidad in situ**, para obtener parámetros de interés. A continuación se muestran:

Tabla 3. Parámetros obtenidos por ensayo muestras TOP 1 y TOP 2 (Madrid, 2012)

	TOP 1	TOP 2
Profundidad (cm)	0-15	15-40
Densidad natural (g/cm³)	1.59	1.53
Densidad seca (g/cm³)	1.09	1.25
Humedad (%)	46	-
Materia orgánica (%)	6.4	-

Entre las conclusiones que a las que se pueden llegar luego de obtener estos parámetros es que las densidades resultaron ser bajas y esto se debe a que el suelo tenía un alto contenido de materia orgánica y que es un material superficial que no corresponde al till glaciario.

Con el fin de obtener los coeficientes de permeabilidades se realizaron ensayos de infiltración a carga variable en las zonas de till supra-glaciario y TOP 1.

Tabla 4. Coeficientes de permeabilidad Till supra-glaciario y TOP 1 (Madrid, 2012).

	TOP 1	Till supra-glaciario
K_{sat} (m/h)	0.069	0.023
K_{sat} (m/s)	1.19x10 ⁻⁵	6.38x10 ⁻⁶

Un dato curioso es que, como se observara más adelante, en las curvas granulométricas obtenidas se aprecia que la muestra TOP 1 tiene un mayor contenido de finos que la muestra correspondiente al till supra-glaciario pero el coeficiente de permeabilidad del primero es mayor. La explicación a esto se lo

atribuyó al hecho de que cuando se realizó el ensayo de infiltración a carga variable in situ en la zona de TOP 1 el terreno no estaba totalmente saturado.

La curva granulométrica para cada muestra recolectada en la toma de muestra 3 se presenta en la figura 3.

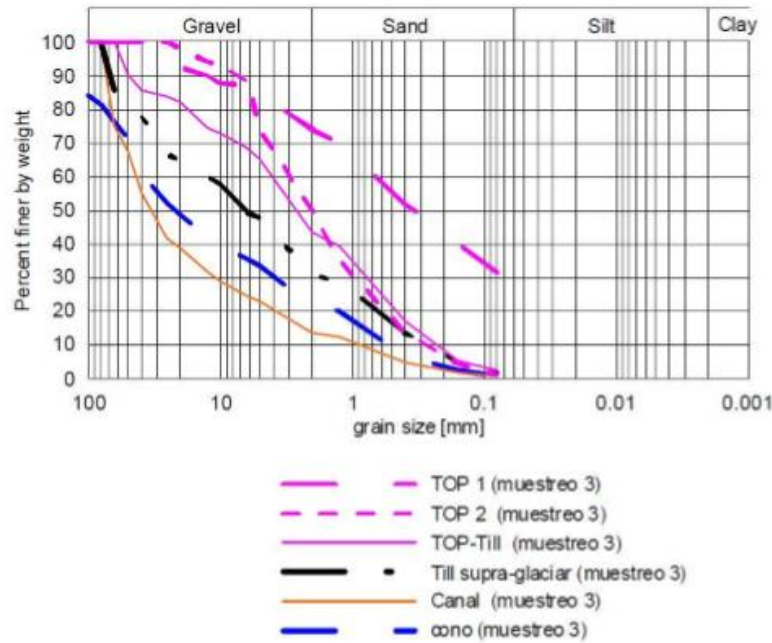


Figura 15. Curva granulométrica para muestras del muestreo 3 (Madrid, 2012).

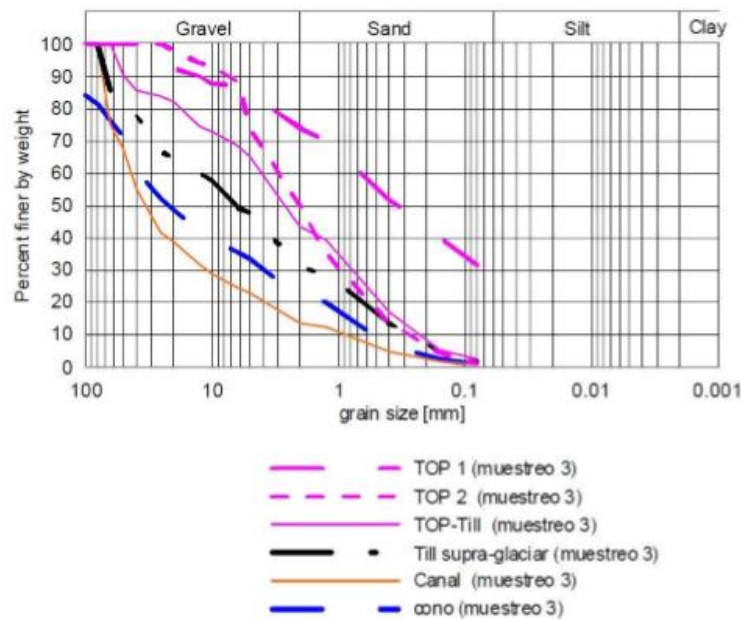


Figura 16. Curvas granulométricas de todas las muestras (Madrid, 2012)

Tabla 5. Cuadro resumen para todas las muestras (Luna, 2015)

	Abanico	Till supra-glaciario	Till sub-glaciario	TOP 1	TOP 2	TOP 3	Till supra-glaciario
Densidad natural (g/cm³)	2.08	-	1.93	1.59	1.53	-	-
Densidad seca (g/cm³)	1.838	-	1.76	1.09	1.25	-	-
Humedad, w (%)	13.2	-	9.15	46	-	-	-
Contenido volumétrico agua	-	-	0.15	-	-	-	-
Gravedad específica, G (g/cm³)	-	-	2.7	-	-	-	-
Grado de saturación, S (%)	-	-	46.2	-	-	-	-
Porosidad, n (%)	-	-	32.3	-	-	-	-
Índice de poros, e	-	-	0.47	-	-	-	-
Materia orgánica	-	-	-	6.4	-	-	-
Coefficiente de permeabilidad, Ksat	-	-	-	1.19x10 ^{^(-5)}	-	-	6.38x10 ^{^(-6)}

4.2 Descripción de los sensores y softwares utilizados

4.2.1 Sensor de VWC 10HS

Al seleccionar un sensor para determinar la humedad de un suelo hay que tomar en cuenta el volumen de suelo que el sensor puede analizar en cuanto al contenido volumétrico de agua. En algunos casos es recomendable utilizar sensores con volúmenes de medida relativamente pequeños, como por ejemplo en invernaderos. En cambio, existen varios casos de aplicación real, donde el uso de este tipo de sensores no es válido. En la cuenca El Rebaixader, se presenta una importante heterogeneidad, lo que resulta en que si trabajamos con un volumen de medida que sea pequeño no mostrara de una forma adecuada el contenido volumétrico promedio de la mediación que se está realizando. Buscando disminuir la aparición de este tipo de problemas en aplicaciones de campo se utilizan volúmenes de medida grandes. Además con este se logran medidas aún más representativas del valor real del contenido volumétrico del agua.

En el lugar de trabajo, la cuenca El Rebaixader, el sensor para medir la humedad que está instalado es el 10HS de la casa Decagon. Este detecta un volumen de suelo presente al momento de trabajo de 1320 cm³ y esto hace posible la obtención de medidas del contenido volumétrico de agua en un suelo con mayor precisión que otros sensores con características similares.



Figura 17. Sensor de humedad, manual del usuario.

El sensor 10HS mide el contenido volumétrico de agua (VWC) del suelo utilizando una técnica de capacitancia. Esto quiere decir, transmitiendo rápidas cargas y descargas eléctricas al suelo a través de electrodos capacitores, donde un campo electromagnético es generado y su tiempo de carga (t) está relacionado a la capacitancia del suelo (C) mediante la siguiente ecuación:

$$t = R C \ln \left[\frac{V - V_f}{V_i - V_f} \right]$$

Donde R es la resistencia de la serie, V es el voltaje en un determinado tiempo t, V_i es el voltaje inicial y V_f es el voltaje aplicado o suministrado. Más allá de esto, para un capacitor eléctrico con un factor geométrico F, la capacitancia está relacionada a la permitividad dieléctrica del medio (ϵ) a través de electrodos capacitores por medio de la siguiente ecuación:

$$C = \epsilon_0 \epsilon F$$

Donde ϵ_0 es la permitividad del medio libre. De esta forma, la permitividad dieléctrica del suelo puede ser determinada a través de la medida del tiempo de carga (t) de un sensor enterrado en el suelo. Como consecuencia de esto, ya que el agua tiene una permitividad dieléctrica mucho mayor que la de los suelos minerales o la del aire, el tiempo de carga (t) en el suelo de la ecuación 1 puede ser correlacionado con el contenido volumétrico del agua.

El sensor 10HS funciona dentro de un rango de temperatura comprendido entre los 0-50°C. Por esta razón, para la medida de la constante o permitividad dieléctrica no se puede utilizar suelos en estado de congelación, ya que ϵ del agua en estado líquida resulta ser mucho mayor que la del agua congelada, con valores de 80 y 5 respectivamente.

Como una de sus principales ventajas este tipo de sensor posee una resolución bastante alta y no demanda que su fuente de alimentación sea muy potente, con lo cual es posible realizar varias mediciones por un periodo de tiempo relativamente largo.

El 10HS hace una detección de un volumen de suelo de 1100 cm³ a su alrededor. Así, las medidas del contenido volumétrico de agua obtenidas con este sensor suelen ser mucho más representativas que con las que se obtienen con otros sensores. A parte de esto, está incluido en el sensor un normalizador del voltaje, el cual da un rango comprendido entre 3-15 voltios.

Los requisitos que debe tener un datalogger para ser compatible con el sensor 10HS son los siguientes:

- ✓ Que este apto para producir una excitación eléctrica en rango de 3-15 voltios.
- ✓ Que esta excitación tenga una duración de más o menos 10 milisegundos.
- ✓ Y que sea capaz de recibir e interpretar voltajes con resoluciones de 12 bits o mayores a estos.

Para conectar el sensor al datalogger se hace por medio de un cable tipo estéreo. Los conectores de este tipo de cables funcionan de manera correcta si el datalogger fuera de la casa de Decagon, al igual que el sensor 10HS.

En este caso se hizo uso de datalogger de la casa Campbell. Esto significa que el cable con el conector tipo estéreo no se adapta bien al datalogger, por lo cual hay que cortar el final del cable y pelarlo y conectarlo adecuadamente.

Las medidas que proporciona el sensor se pueden interpretar como un voltaje que presenta una relación estrecha con el VWC del suelo que se está estudiando. Si se tiene una gran cantidad de agua, se tendrá un valor alto de la lectura del sensor. Esta medida podría variar en un rango comprendido entre 300 y 1250 mili voltios.

4.2.2 Sensor de succión MPS-2



Figura 18. Sensor MPS-2, manual del usuario.

El MPS-2 mide el potencial de agua (succión) y la temperatura de materiales porosos. El MPS-2 tiene un bajo consumo de energía lo que lo hace un sensor ideal para el entierro permanente en el suelo y para la lectura continua con un datalogger o lecturas periódicas con un lector de mano.

Todas las técnicas de medida del potencial de agua de los suelos miden la energía potencial del agua en equilibrio con el agua en el suelo. La Segunda Ley de Termodinámica expresa que los sistemas que están conectados con diferentes niveles de energía se moverán hacia niveles de equilibrio. Por esta razón, si un objeto entra en contacto hidráulico con el suelo, el potencial de agua del objeto llegará al equilibrio con el potencial de agua del suelo.

Otra categoría de sensores que miden el potencial de agua utilizan una técnica basada en el equilibrio de la matriz sólida para medir el potencial de agua del suelo. Esta técnica introduce un material conocido con una matriz de poros estática en el suelo y permite que se alcance el equilibrio hidráulico que se expresa en la Segunda Ley de Termodinámica.

El MPS-2 utiliza el mismo principio descrito anteriormente, pero mide la constante dieléctrica de la matriz del suelo, utilizando discos cerámicos porosos, para determinar el potencial de agua. La constante dieléctrica del aire, de la cerámica sólida, y la del agua son 1,5 y 80 respectivamente. Entonces, la constante dieléctrica de los discos cerámicos van a tener una fuerte dependencia de la cantidad de agua que esté presente en los espacios porosos de la cerámica. Es por esto que al medir la

permitividad dieléctrica de los discos porosos, un amplio rango de contenidos de humedad pueden ser resueltos.

El contenido y potencial de agua están vinculados por una única relación a un material dado, llamado la curva característica de la humedad. La cerámica usada en el sensor tiene una amplia distribución de tamaño de poro y es consistente entre los discos. Esto quiere decir, que si la cantidad de agua de la cerámica es medida de manera correcta, junto con la medida actual del potencial de agua, entonces se tendrá una curva de calibración que dará una calibración estándar para el MPS-2 en términos del potencial de agua. Esta calibración no dependerá del tipo de suelo en donde el sensor este instalado.

El potencial de agua total del suelo (Ψ_t) está compuesta por cuatro componentes de potencial de agua:

$$\Psi_t = \Psi_p + \Psi_g + \Psi_o + \Psi_m$$

Donde, los subíndices p, g, o y m se refieren a presión, gravitacional, osmótica y matricial respectivamente. De estos cuatro componentes, solo Ψ_o y Ψ_m son significativos y usualmente medidos en el suelo. Ψ_o surge de las sales disueltas en el suelo, y es importante solo si está presente una barrera semi permeable que prevenga el movimiento iónico (raíces de plantas, membranas celulares). Ψ_m surge de la atracción del agua hacia las partículas de suelo, y es el factor más importante del potencial de agua, con excepción de suelos que están bastante afectados por la sal. El MPS-2 solo mide el potencial matricial del suelo (Ψ_m). En suelos que tengan una fuerte influencia de la sal, puede ser necesario el cuantificar Ψ_o independientemente si se mide el potencial de agua del suelo relacionándolo con actividad biológica.

El rango de medición de este sensor está comprendido entre los -5 kPa y los -500 kPa y tiene una precisión de medida de aproximadamente del 25%. Pero hay que tener en cuenta que a medida que decrece el potencial del agua las medidas son menos precisas.

El MPS-2 utiliza un termostato en la superficie para tomar las lecturas de la temperatura. Está localizado debajo del sensor sobre moldeado, y medirá la temperatura del sensor en la superficie.

En suelos en estado de congelación este tipo de métodos no se puede utilizar para medir el potencial de agua. Esto se debe a que la permitividad dieléctrica del agua congelada es igual a 5, la cual está muy por debajo de la constante dieléctrica del agua líquida, que es igual a 80, y también por debajo de la de los discos cerámicos.

Si se tiene un suelo congelado se podrá obtener el valor del potencial de agua midiendo lo que es la temperatura del suelo, por medio del termostato que posee el sensor. Existe la relación de que por cada grado Celsius por debajo de 0 el potencial de agua decrecerá 1,200 kPa. Pero esta relación será efectiva en suelos, si y solo si se tiene potenciales menores a -50 kPa (Spaans y Baker, 1996).

4.2.3 Datalogger Cr10x

Datalogger CR10X es un registrador/ controlador de datos completamente programable con una memoria no volátil y una batería recubierta por un módulo pequeño, sellado y áspero. La combinación de confiabilidad, versatilidad y el soporte de telecomunicaciones que brinda el aparato, lo convierte en la opción favorita para las aplicaciones de redes y de registro de datos. Se trata de un producto de Campbell Scientific.

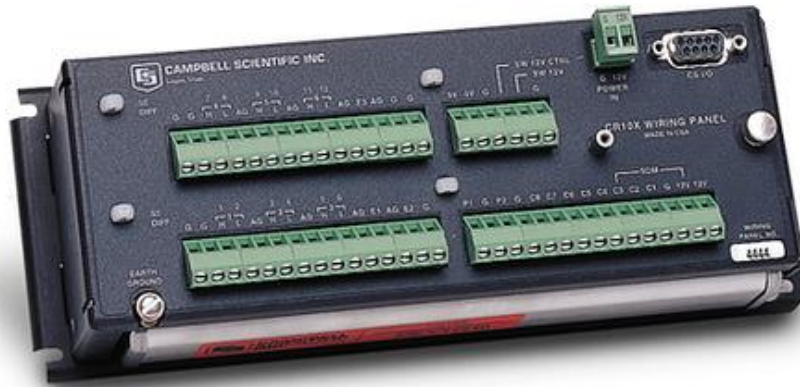


Figura 19. Datalogger CR10X, manual del usuario.

Este sistema está compuesto por cuatro elementos principales, las cuales son: el procesamiento de datos y medidas, almacenamiento de datos, restauración de datos y el registro de los mismos. Además el sistema está equipado con sondas, con el fin de medir diferentes parámetros de interés como son la temperatura y la humedad relativa. La interacción entre las sondas y el datalogger funciona de la siguiente manera: las sondas transmiten una pulsación eléctrica y el datalogger la lee para luego medir, transformar e interpretar esta información. Cuando el datalogger ha procesado los datos procede a salvarlos en su memoria; cabe destacar que el datalogger posee varias, una principal y algunas secundarias. Hay posibilidades de sistematizar el datalogger para que cada segundo reciba una sonda eléctrica, almacene estos datos y que realice una síntesis de todo este proceso y la guarda en su memoria principal.

Otra función que tiene el datalogger es que puede calcular y almacenar la media de los datos proporcionados por tiempos impuestos, por ejemplo la temperatura más alta transcurrido un día. La información que el datalogger procese y almacena puede ser transferida a un computador para un manejo más fácil de los datos.

4.2.4 Multiplexor: Am16/32

El multiplexor AM16/32B es una creación de Campbell scientific cuya función es incrementar significativamente el número de sensores que podemos medir con un datalogger Campbell Scientific. Se conecta al datalogger y añade terminales para conectar sensores adicionales de casi cualquier tipo.

Ventajas y características principales

- ✓ Aumenta significativamente la cantidad de sensores que se puedan utilizar con el datalogger.
- ✓ Multiplexa un máximo de 32 sensores.
- ✓ Resulta ser compatible con muchos tipos de sensores como por ejemplo, refractómetros, potenciómetros, galgas extensiométricas, cuerda vibrante, reflectómetros y medidores de humedad del suelo.
- ✓ Disminuye el coste que implica el cableado individual de cada uno de los sensores, ya que si no fuera por este habría que utilizar largas longitudes de cable.
- ✓ Protege al equipo en caso de que haya descargas eléctricas por medio de tubos de gas colocados en las entradas y toma para tierra.
- ✓ El multiplexor está dotado de sujetadores de cables para impedir que los cables de los sensores e hilos conductores resulten dañados.
- ✓ Con el multiplexor no es necesario el uso de condensadores de bloqueo y como resultado el costo del sensor disminuye.

El control operativo del multiplexor funciona a través de las terminales de control, las cuales se presentan en el aparato en forma de huecos que se conectan mediante cables. La línea reset es usada para activar el multiplexor. En la línea clock cuando la aguja avanza un paso, el multiplexor cambia de cadena, es decir de la primera cadena a la segunda. La línea ground del multiplexor debe estar conectada a tierra mediante un cable. Por último, el multiplexor requiere un suplidor de energía continuo 12 Vdc, por lo que mediante esta línea se alimenta al aparato.

Existen otras cuatro terminales dedicadas a la conexión multiplexor-datalogger y están localizados debajo del COM. Las terminales están etiquetadas como: odd H, odd L, even H y even L.

Cuando el multiplexor se enciende y las agujas avanzan un paso, la primera cadena (1H, 1L, 2H, 2L) se conecta a COM. Cuando las agujas vuelven a dar otro paso, la primera cadena se pone en un circuito abierto, y la segunda cadena se conecta a « com ». Así sucesivamente se pueden utilizar todas las cadenas que en total son 16.

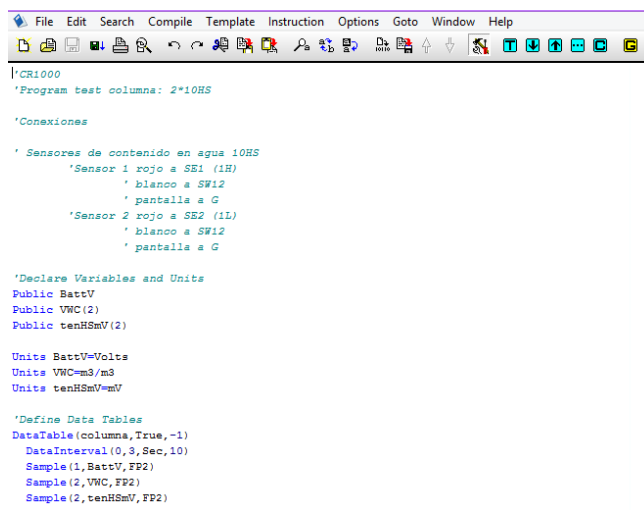
4.2.5 Sondas de temperatura: T108

La sonda T108 se conecta directamente a los dataloggers de Campbell Scientific e integran un sensor de temperatura de precisión protegido por una vaina resistente al agua, con 3m de cable. El cable de poliuretano es muy resistente, también a UV y agua.

- ✓ Sondas robustas y versátiles.
- ✓ Bajo coste.
- ✓ Buena precisión.
- ✓ Posibilidad de cables largos.
- ✓ Multiplexores disponibles para la utilización de múltiples sensores.

El rango de temperaturas que se pueden medir esta entre -3°C y $+90^{\circ}\text{C}$. Para la recreación de esta columna se usaran 3 sondas de temperatura de este tipo.

4.2.6 Pc 400



```
|'CR1000
'Program test columna: 2*10HS

'Conexiones

' Sensores de contenido en agua 10HS
'Sensor 1 rojo a SE1 (1H)
' blanco a SW12
' pantalla a G
'Sensor 2 rojo a SE2 (1L)
' blanco a SW12
' pantalla a G

'Declare Variables and Units
Public BattV
Public VWC(2)
Public tenHSmV(2)

Units BattV=Volts
Units VWC=m3/m3
Units tenHSmV=mmV

'Define Data Tables
DataTable(columna,True,-1)
DataInterval(0,3,Sec,10)
Sample(1,BattV,FP2)
Sample(2,VWC,FP2)
Sample(2,tenHSmV,FP2)
```

Figura 20. Interfaz del programa.

PC400 es una aplicación de software utilizada para configurar, configurar y recuperar datos de los dataloggers de Campbell Scientific. PC400 es una solución ideal para los usuarios que desean una colección de datos fiable y fácil de usar. Es un software que a través de un único medio de telecomunicaciones, recoge datos programados y visualizaciones gráficas en tiempo real.

La pantalla principal del PC400 proporciona tres pestañas para las funciones de comunicaciones (Reloj / Programa, Monitor de Datos y Recolección de Datos), así como botones para ejecutar utilidades para trabajar con archivos de datos (View, Split y Card Convert) y para generar o editar programas de registro de datos (Short Cut, CRBasic, y Edlog). También hay un botón para iniciar la utilidad de configuración del dispositivo (o DevConfig). DevConfig se utiliza para enviar nuevos sistemas operativos a los registradores de datos y otros dispositivos, y para configurar los ajustes en los registradores de datos / dispositivos. Estas pantallas y utilidades también son accesibles desde el menú PC400, al igual que otras herramientas, como un emulador de terminal, PakBus Graph y LogTool, un programa para ver y almacenar registros de comunicación. Cada aplicación tiene su propia ayuda extensa.

Para poder leer los datos ofrecidos por el sensor 10HS a través del programa PC400 se tuvo que crear un programa para este caso en específico, ya que dependiendo del sensor que se tenga y los datos que se quieran conseguir, se escriben diferentes programas. De esta forma se obtuvieron las lecturas de interés llevadas a cabo en tiempo real.

Los datos que se toman en cuenta son las lecturas del voltaje en mili voltios ofrecidas por el sensor y el VWC para así compararlos con los obtenidos en laboratorio. Luego se grafican los mili voltios versus los VWC del laboratorio, y con esto se consigue una ecuación que correlaciona los dos valores.

4.3 Descripción del ensayo

4.3.1 Ensayo de columna de infiltración

El objetivo principal de un ensayo como este es el de medir empíricamente la infiltración en un suelo natural, producida por el agua infiltrada, proveniente de la precipitación, en su composición. Además de ver los efectos de la infiltración sobre la masa terrea se quiere analizar también, como varia la permeabilidad con la saturación.

Los ensayos de columna de infiltración se pueden definir como ensayos de infiltración a volumen constante. Un caudal de agua es aplicado sobre un cilindro relleno con la muestra previamente preparada y tamizada. Utilizando los cálculos realizados por un programa de ecuaciones finitas (Code_Bright) se obtuvo este caudal de infiltración que fue de 5×10^{-2} Kg/m²s.

El ensayo se llevó a cabo en un cilindro de metacrilato con medidas de 30 centímetros de diámetro por 60 centímetros de altura. En el cilindro se colocó la muestra previamente preparada y tamizada (tamiz no. 4) compactado por capas a una densidad seca de 1.75 g/cm³. Esta densidad corresponde a la densidad seca natural del suelo en campo. Dentro del suelo se instalaron sensores que miden el contenido volumétrico de agua (10HS) a alturas de 10, 30 y 50 centímetros medidos desde la parte superior de la columna. También se instalaron sensores para controlar la succión a alturas de 10 y 50 centímetros, medidos desde arriba.

Una célula de carga fue instalada en la base de la columna, para de esta manera controlar el peso total con el que se estaba trabajando.

4.3.2 Metodología de ensayo

A continuación se presenta los pasos que se siguieron para el montaje de la columna de infiltración y cada etapa del ensayo:

- 1) Preparación de la muestra de suelo: la muestra recolectada en el campo venia en bloques. Se procedió a machacar la muestra hasta tener un peso de aproximadamente 60 kg de suelo triturada. Posteriormente como no se disponía ni conocía la curva de retención del material se procedió a utilizar como referencia la curva de retención de Boris Luna (2015) para saber que tamiz utilizar. Como se trataba de una arena gravosa tamizo con el tamiz 3/8", ya que el tamaño máximo de las partículas era de 1 centímetro.

Tabla 6. Datos para montar columna.

Diámetro (cm)	30
Área (cm²)	706.8583471
Altura muestra (cm)	60
Volumen (cm³)	42411.50082
Humedad	0.005
Peso muestra seco(g)	74220.12644
Peso muestra húmeda	74591.22707
Peso muestra húmeda/6 tongadas	12431.87118
h real (cm)	60
Volumen real (cm³)	42411.50082
Densidad seca inicial (g/cm³)	1.75



Figura 21.Preparación del suelo.

- 2) No habrá drenaje en la columna por eso se selló la misma con silicona para que no fuera posible la salida del agua. Se dejó que el suelo se secase al aire libre.
- 3) Distribución del suelo tratado y tamizado: la masa terrea es colocada en capas de 10 centímetros dentro del cilindro de metacrilato y se compacta de tal forma que resulte uniforme utilizando un pistón de hierro hasta que alcance un espesor de aproximadamente de los 10 centímetros, antes mencionados. Luego que se coloca la primera capa se instalan un sensor de VWC Y uno de succión de acuerdo al diseño previamente calculado. La densidad a la que se compacto cada tongada de suelo fue de 1.75 g/cm^3 . Se compacta la muestra con una energía baja ya que los sensores instalados dentro del suelo eran delicados.



Figura 22. Colocación dentro del metacrilato.

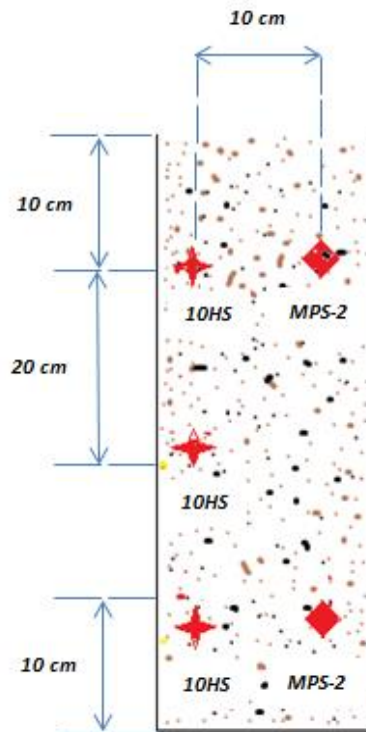


Figura 23. Esquema del montaje de la columna de infiltración.

Como se puede observar en la figura, se comenzó a colocar capas de suelo de 10 centímetros de espesor. En la capa inferior, se instalaron un sensor 10HS y un sensor MPS-2, para medir el contenido volumétrico de agua y la succión, respectivamente. Luego se colocaron 20 centímetros más de suelo y en esta nueva capa un sensor 10HS. Posteriormente sobre 10 centímetros masa terrea un sensor 10HS y un sensor MPS-2 fueron instalados. En las profundidades donde coincidían los dos tipos de sensores se tomó en cuenta que estos debían de estar uno del otro a no menos de 10 centímetros y además se colocaron diagonalmente.

2.3.3 Calibración sensor 10HS

El sensor 10HS viene pre calibrado de fábrica para medir la permitividad dieléctrica de todo tipo de suelos con una precisión del $\pm 3-4\%$. En el caso de que queramos obtener una mayor precisión, del $\pm 1-2\%$ por ejemplo, se recomienda que se realice una calibración del sensor de acuerdo al tipo de suelo que se esté usando en el momento. Para este tipo de procesos Decagon propone una ecuación para este tipo de procesos que es la siguiente:

$$VWC\left(\frac{m^3}{m^3}\right) = 2.97 * 10^{-9}mV^3 - 7.37 * 10^{-6}mV^2 + 6.69 * 10^{-3}mV - 1.92$$

Se recuerda que el material utilizado fue una arena gravosa con minerales, descrito detalladamente en el apartado, y se utilizó un peso total de 5650 gramos de suelo aproximadamente.



Figura 24. Calibración del 10HS.

Para la calibración se siguió el siguiente procedimiento:

- 1) Se colocó el material en un recipiente de 160 cm². Como mínimo se requiere un diámetro de 14 cm para realizar la calibración de este tipo de sensor y más si se va a colocar en forma vertical. Esto se debe a que el sensor de 10 HS colocado en esta posición tiene un volumen de influencia correspondiente al de un cilindro de 14 cm de diámetro y 20 cm de altura. Si no se toma en cuenta este tipo de especificaciones entonces las paredes del cilindro pueden distorsionar las medidas ofrecidas por el sensor.
- 2) El cilindro se dividió en 5 partes a lo largo de su altura cada 4 centímetros y se procedió a colocar el material por capas. Cuando se iba colocando cada capa de suelo esta se iba compactando. Este material tenía que tener la misma densidad seca que en el campo y como anteriormente se tenía una recolección del material de varios muestreos se hizo un promedio de las densidades de toda la morrena, con un valor de 1.75g/cm³.

- 3) A medida que se iba llenando el recipiente se iba compactando menos el suelo ya que el sensor 10HS no es muy resistente y es difícil introducirlo en terrenos altamente compactados. Además el sensor tiene que quedar totalmente enterrado incluyendo el mango plástico que tiene en su parte superior.
- 4) Luego de que esta el sensor totalmente enterrado se proceden a tomar las medidas. El tiempo de medición era cada 5 segundos.
- 5) Una vez obtenidas las medidas del sensor, sin desenterrar el mismo, se procedió a tomar una muestra de suelo justo al lado del sensor con un toma muestra de volumen conocido. En este caso no fue posible tomar la muestra de suelo en ninguna de las etapas ya que las propiedades del suelo hicieron que fuera imposible la retención del material dentro del anillo toma muestra.

Así que se procedió a calcular el VWC, conociendo la humedad aportada, y el volumen global de la muestra.
- 6) Luego se agrega una cantidad específica de agua en este caso 200 ml y se repite todo el proceso nuevamente. Esto se hace hasta que la muestra este saturada.
- 7) Con estos datos ya puede construirse la gráfica VWC versus medidas del sensor en mili voltios.

Tabla 7. Calculo de los VWC de las diferentes muestras.

Nº de muestra	Lecturas del sensor, Permitividad Dieléctrica ϵ_a	Altura (cm)	Volumen Total (cm ³)	Masa Suelo Seco (g)	Densidad Seca Aparente (g/cm ³)	VWC= V_w/V_t (m ³ /m ³)
1	608.1	18	2890.91	5621.21	1.94	0.010
2	698.73	19.6	3147.88	5516.38	1.75	0.065
3	700.68	20	3212.12	5697.55	1.77	0.115
4	747.54	19.8	3180.00	5936.52	1.87	0.137
5	845.163	17	2730.30	5941.90	2.18	0.195
6	921.445	18	2890.91	5979.90	2.07	0.240

Tabla 8.Datos necesarios para el cálculo de los VWC.

Sample Number	1	2	3	4	5	6
Mass of moist soil (g)	5649.318527	5826	5992	6056	6153	6315
Mass of dry soil (g)	5621.212465	5621.212465	5621.21247	5621.212465	5621.212465	5621.212
Mass(g), volume of water (cm3)	28.10606233	204.7875348	370.787535	434.7875348	531.7875348	693.7875
Sample Volume	2890.909268	3147.87898	3212.12141	3180.000195	2730.303197	2890.909
VWC LAB	0.009722222	0.06505572	0.11543385	0.136725632	0.194772337	0.239989
Average reading raw or mV	608.10	698.73	700.68	747.54	845.16	921.445
VWC CR100	0.09	0.14	0.15	0.18	0.19	0.22
h finales	18	19.6	20	19.8	17	18
ml de agua agregados	0	176.6814725	166	64	97	162
Agua (g)	28.10606233	204.7875348	370.787535	434.7875348	531.7875348	693.7875
Vporos	769.6970168	1026.666729	1090.90916	1058.787944	609.0909464	769.697
Sr	0.036515748	0.199468366	0.33988855	0.410646473	0.873083959	0.901377

Tabla 9.Errores con cada una de las ecuaciones.

Ecuación utilizada	Error (%)
Decagon	192.4404552
Calibración Polinómica	54.11542522
Calibración Lineal	-20.69381866

Dificultades en la calibración

- ✓ La calibración se debería llevar a cabo con material que proceda de la zona donde los sensores irán finalmente instalados, no con una mezcla de materiales de diferentes zonas como es mi caso.
- ✓ La humedad aportada quizá no fue la más adecuada de ahí que los puntos del medio no siguieran la tendencia del punto del principio ni del final.
- ✓ Quizás se compacto el suelo más de lo que requería.
- ✓ Dada la complejidad de los suelos, la exactitud de las medidas del VWC puede ser muy pobres a pesar de una medida exacta de la permitividad dieléctrica. Algunos ejemplos pueden ser suelos altamente compactados, suelos con baja densidad aparente, suelos con un gran contenido de materia orgánica y suelos con una composición mineral altamente dieléctrica.

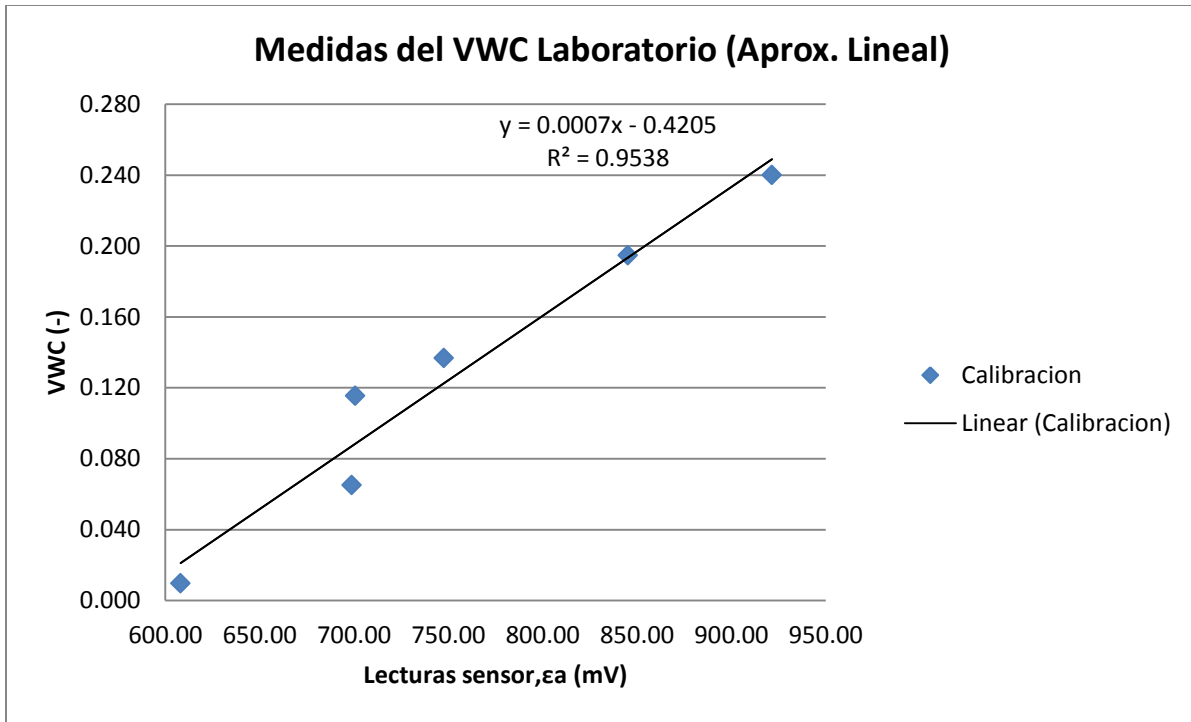


Figura 25.Grafica de aproximación lineal.

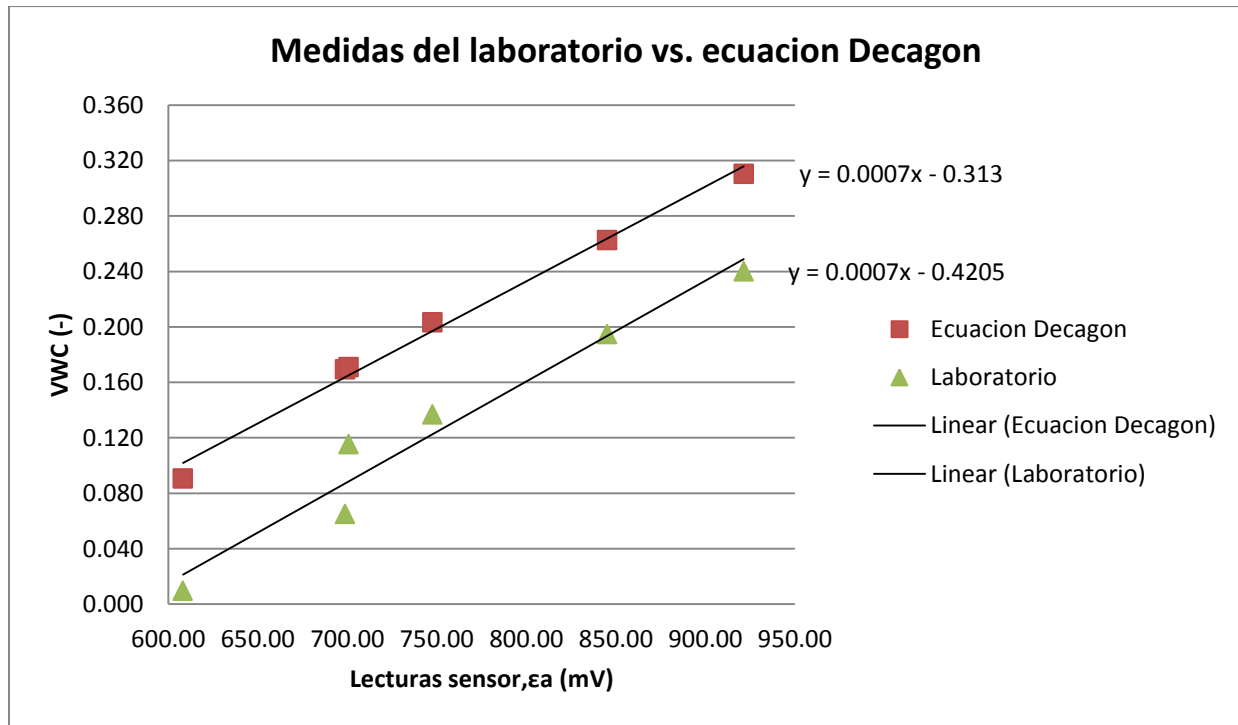


Figura 26.Comparacion entre la ecuación de Decagon y la aproximación lineal.

5. Modelo predimensionamiento en Code_Bright

En medios porosos, sometidos a condiciones térmicas, hidráulicas y mecánicas, se producen fenómenos termo-hidro-mecánicos relevantes (THM). De hecho, existen varias interacciones mutuas que deben tomarse simultáneamente en cuenta en los análisis. La expansión térmica del agua en los propios poros provoca cambios en el grado de saturación o, si el material está saturado o casi saturado, aumenta la presión del agua. La difusión de vapor inducido térmicamente y la dependencia de la viscosidad del agua sobre la temperatura también afectan significativamente al proceso de transferencia de agua.

Por otro lado, los cambios en las condiciones hidráulicas influyen en el campo de temperatura a través de variaciones de la conductividad térmica y afectan el campo de esfuerzo / deformación debido a la presión del agua porosa ya los cambios de presión del gas poroso.

Una consecuencia inevitable de todos los fenómenos que interactúan simultáneamente es la necesidad de llevar a cabo un análisis de THM acoplado en el que todos los aspectos principales del problema puedan ser considerados de manera integrada.

El programa descrito aquí es una herramienta diseñada para manejar problemas acoplados en los medios geológicos. El código de computadora, originalmente, se desarrolló sobre la base de una nueva teoría general para los medios salinos. El programa se ha generalizado para modelar los procesos termo-hidro-mecánicos (THM) de forma acoplada en medios geológicos. Básicamente, el código acopla problemas mecánicos, hidráulicos y térmicos en los medios geológicos.

El enfoque teórico consiste en un conjunto de ecuaciones gobernantes, un conjunto de leyes constitutivas y un enfoque computacional especial.

CODE_BRIGTH utiliza el sistema GiD para preprocesamiento y postprocesamiento. GiD es desarrollado por el Centro Internacional de Métodos Numéricos de Ingeniería (CIMNE). GiD es una interfaz gráfica de usuario interactiva que se utiliza para la definición, preparación y visualización de todos los datos relacionados con simulaciones numéricas. Estos datos incluyen la definición de la geometría, materiales, condiciones, información de la solución y otros parámetros. El programa también puede generar la malla de elementos finitos y escribir la información para un programa de simulación numérica en un formato adecuado para CODE_BRIGTH. También es posible ejecutar la simulación numérica directamente desde el sistema y visualizar la información resultante sin necesidad de transferir archivos.

Todos los materiales, condiciones y parámetros de solución también se pueden definir en la geometría sin que el usuario tenga ningún conocimiento de la malla. El acoplamiento se realiza una vez que el problema ha sido totalmente definido. Las ventajas de hacer esto son que, usando estructuras de datos asociativas, se pueden hacer modificaciones en la geometría y toda la otra información se actualizará automáticamente.

5.1 Criterios básicos de formulación

Se considera un medio poroso compuesto por granos sólidos, agua y gas. Los aspectos térmicos, hidráulicos y mecánicos serán tomados en cuenta, incluyendo el acoplamiento entre ellos en todas las direcciones posibles. El problema se formula en un enfoque multifásico y multiespecies.

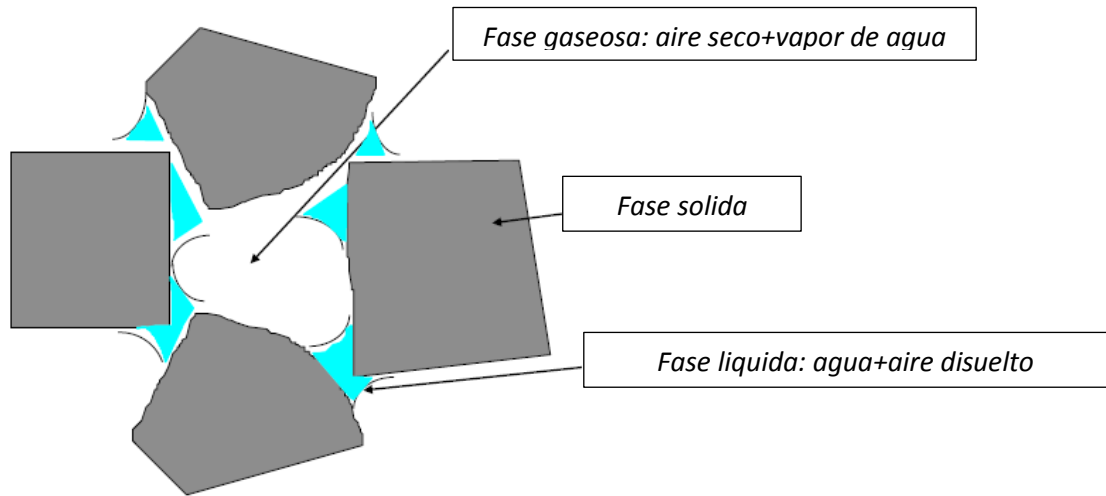


Figura 27. Representación esquemática de un medio poroso no saturado (manual del usuario).

Las tres fases son:

- ✓ Fase solida (s): mineral
- ✓ Fase liquida (l): agua + aire disuelto
- ✓ Fase gaseosa (g): mezcla de aire seco y vapor de agua

Las tres especies son:

- ✓ Solido (-): el mineral es consistente con la fase solida
- ✓ Agua (w): como agua líquida o evaporada en la fase gaseosa
- ✓ Aire (a): aire seco, como gas o disuelto en la fase liquida

Los siguientes supuestos y aspectos se tienen en cuenta en la formulación del problema:

- ✓ El aire seco se considera una sola especie y es el componente principal de la fase gaseosa. La ley de Henry se utiliza para expresar el equilibrio del aire disuelto.
- ✓ Se asume el equilibrio térmico entre fases. Esto significa que las tres fases están a la misma temperatura.

- ✓ La concentración de vapor está en equilibrio con la fase líquida. La ley psicrométrica expresa su concentración.
- ✓ Las variables de estado (también llamadas incógnitas) son: desplazamientos sólidos, u (tres direcciones espaciales); Presión del líquido, P_l ; Presión de gas, P_g ; Y temperatura.
- ✓ El equilibrio del momento para el medio como un todo se reduce a la ecuación del equilibrio de tensión junto con un modelo mecánico constitutivo para relacionar las tensiones con las deformaciones. Las deformaciones se definen en términos de desplazamientos.
- ✓ Se asumen pequeñas deformaciones y pequeñas proporciones de deformación. Los términos usados con respecto al desplazamiento sólido no son tomados en cuenta después de que la formulación se transforma en términos de derivados materiales (de hecho, los derivados materiales se aproximan como derivados eulerianos del tiempo). De esta manera, la deformación volumétrica es considerada como factor de importancia.
- ✓ El equilibrio del momento para especies disueltas y para fases fluidas se reduce a ecuaciones constitutivas (ley de Fick y ley de Darcy).
- ✓ Los parámetros físicos en las leyes constitutivas vienen dados en función de la presión y la temperatura. Por ejemplo: la concentración de vapor bajo la superficie planar (en ley psicrométrica), la tensión superficial (en la curva de retención), la viscosidad dinámica (en la ley de Darcy), dependen fuertemente de la temperatura.

5.2 Ecuaciones de gobierno

Las ecuaciones de gobierno para el flujo multifásico no isotérmico de agua y gas a través de medios salinos deformables porosos han sido presentadas por Olivella (1994). A continuación se explicaran detalladamente.

Las ecuaciones que rigen este problema pueden clasificarse en cuatro grupos principales. Estas son: ecuaciones de equilibrio, ecuaciones constitutivas, relaciones de equilibrio y definición de fuerzas. Las ecuaciones para el balance de masa se establecieron siguiendo el enfoque composicional. Es decir, el balance de masa se realiza para el agua, el aire y las especies de sal en lugar de utilizar fases sólidas, líquidas y gaseosas. La ecuación para el equilibrio de energía se establece para el medio como un todo. La ecuación del equilibrio de momento para el medio poroso se reduce a la del equilibrio de tensión.

5.2.1 Ecuaciones de balance

El enfoque compositivo se adopta para establecer las ecuaciones del balance de masa. La masa volumétrica de una especie en una fase (por ejemplo, agua en fase gaseosa θ_g^w) es el producto de la fracción de masa de esa especie (w_g^w) y la densidad aparente de la fase (ρ_g), es decir, $\theta_g^w = w_g^w \rho_g$.

El flujo de masa total de una especie en una fase (por ejemplo, el flujo de aire presente en la fase gaseosa j_g^w) es, en general, la suma de tres términos:

1. El flujo no advectivo: i_g^w , es decir, difusivo / dispersivo.
2. El flujo advectivo causado por el movimiento del fluido: $\theta_g^w q_g$, donde q_g es el flujo de Darcy.
3. El flujo advectivo causado por el movimiento sólido: $\phi S_g \theta_g^w du / dt$ donde du / dt es el vector de las velocidades sólidas, S_g es la fracción volumétrica de los poros ocupados por la fase gaseosa y ϕ es la porosidad.

La suma de los flujos advectivos y los no advectivos se separa del flujo total con el fin de simplificar las ecuaciones algebraicas. Este flujo es relativo a la fase sólida y se denomina $j_g'^w$. Corresponde al flujo total menos la parte advectiva causada por el movimiento sólido. Cuando la deformación sólida es despreciable, entonces $j' = j$. La contribución relativa de cada término de flujo al flujo total no es siempre la misma. Por ejemplo, la difusión será más importante si la advección es pequeña.

✓ Balance de masa del sólido

El balance de masa del sólido presente en el medio se escribe como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta_s(1 - \phi)) + \nabla \cdot (j_s) = 0$$

Donde θ_s es la masa de sólido por unidad de volumen de sólido y j_s es el flujo de sólido. A partir de esta ecuación, se obtuvo una expresión para la variación de porosidad como la siguiente:

$$\frac{D_s \phi}{D_t} = \frac{1}{\theta_s} \left[(1 - \phi) \frac{D_s \theta_s}{D_t} \right] + (1 - \phi) \frac{du}{dt}$$

Se ha utilizado el derivado material con respecto al sólido y su definición es:

$$\frac{D_s}{D_t}(\blacksquare) = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{du}{dt} \cdot \nabla(\blacksquare)$$

✓ Balance de masa de agua

El agua está presente en las fases líquida y gaseosa. El balance de masa total de agua se expresa como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta_l^w S_l \phi + \theta_g^l S_g \phi) + \nabla \cdot (j_l^w + j_g^w) = f^w$$

Donde f^w es un suministro externo de agua. No se incluye un término interno de producción porque se realiza el balance de masa total dentro del medio. El uso del derivado material conduce a:

$$\phi \frac{D_s(\theta_l^w S_l + \theta_g^w S_g)}{D_t} + (\theta_l^w S_l + \theta_g^w S_g) \frac{D_s \phi}{D_t} + ((\theta_l^w S_l + \theta_g^w S_g) \phi) \nabla \cdot \frac{du}{dt} + \nabla \cdot (j_l'^w + j_g'^w) = f^w$$

El objetivo final es encontrar las incógnitas de las ecuaciones gobernantes. Por lo tanto, las variables dependientes tendrán que estar relacionadas con las incógnitas de alguna manera. Por ejemplo, el grado de saturación se calculará utilizando una curva de retención que debería expresarlo en términos de temperatura, presión de líquido y presión de gas.

La porosidad aparece en esta ecuación del balance de masa de agua no sólo como un coeficiente, sino también en un término que implica su variación causada por diferentes procesos. También está oculto en variables que dependen de la porosidad (por ejemplo, permeabilidad intrínseca). La forma de expresar el término derivado como una función de las variables de estado es a través de la ecuación del balance de masa sólida. Esto permite tener en cuenta correctamente la influencia de la variación de la porosidad en la ecuación del equilibrio para el agua.

✓ Balance de masa de aire

Una vez que se han escrito las otras ecuaciones del balance de masa, es sencillo obtener el balance de masa de aire teniendo en cuenta que el aire es el componente principal de la fase gaseosa y que también puede estar presente como aire disuelto en la fase líquida.

$$\phi \frac{D_s(\theta_l^a S_l + \theta_g^a S_g)}{D_t} + (\theta_l^a S_l + \theta_g^a S_g) \frac{D_s \phi}{D_t} + ((\theta_l^a S_l + \theta_g^a S_g) \phi) \nabla \cdot \frac{du}{dt} + \nabla \cdot (j_l'^a + j_g'^a) = f^a$$

✓ Balance de momento del medio

El equilibrio del momento se reduce al equilibrio de tensiones si se ignoran los términos inerciales:

$$\nabla \cdot \sigma + \mathbf{b} = 0$$

Donde σ es el tensor de tensión y \mathbf{b} es el vector del campo de fuerzas.

✓ Balance de la energía interna del medio

La ecuación para el balance energético interno del medio poroso se establece teniendo en cuenta la energía interna en cada fase (E_s , E_l y E_g):

$$\frac{\partial}{\partial t} (E_s \rho_s (1 - \phi) + E_l \rho_l S_l \phi + E_g \rho_g S_g \phi) + \nabla \cdot (i_c + j_{Es} + j_{El} + j_{Eg}) = f^Q$$

Donde i_c es flujo de energía debido a la conducción a través del medio poroso, los otros flujos (j_{Es} , j_{El} y j_{Eg}) son flujos advectivos de energía causados por movimientos de masa y f^Q es un suministro de energía interna / externa. En este caso, este término explica, por ejemplo, la disipación de energía debida a una deformación media que no es explícita porque es insignificante en la mayoría de los casos. El uso del derivado material permite obtener una ecuación formalmente similar al balance de masa del agua. La razón de la semejanza es que tanto el agua como la energía interna, se consideran presentes en las tres fases.

Por lo tanto, sólo se requiere una ecuación que exprese el equilibrio de la energía interna en el medio poroso como un todo. En problemas que involucran materiales geológicos, esta ecuación generalmente se reduce al equilibrio de entalpía. La razón de esto es que las variaciones de temperatura producen variaciones de entalpía que son muy grandes comparadas con las variaciones de energía suministradas por el trabajo de deformación.

Los flujos en el término de divergencia incluyen conducción de calor y advección de calor causada por el movimiento de cada especie en el medio. Un flujo de masa no advectivo causa un flujo de calor advectivo porque una especie dentro de una fase se mueve y transporta energía. Contrariamente a lo que ocurre con el movimiento de un contaminante en un sistema de aguas subterráneas, el término difusivo para el transporte de calor (conducción de calor) es mucho mayor que el término relativo a la dispersión hidromecánica (flujo no advectivo causado por la velocidad de los fluidos). Por esta razón, este término generalmente no se toma en cuenta.

5.2.2 Ecuaciones constitutivas

Se definen como el tipo de ecuaciones que relacionen los gradientes de las variables con los flujos, presentes en el problema a resolver, además de relacionar las tensiones con las deformaciones.

Las ecuaciones constitutivas utilizadas en la resolución de este problema son únicamente las relacionadas con fenómenos hidráulicos. A continuación se mencionan las utilizadas:

- ✓ La ley de Darcy es la que rige el flujo advectivo del líquido y del gas:

$$q_a = -K_a \nabla \left(z + \frac{p_a}{\gamma_a} \right)$$

Donde,

a = se refiere al líquido o al gas, en dependencia del hecho de cual flujo se está tomando en cuenta.

z = coordenada en sentido vertical opuesta a la gravedad.

$K_a = K_{\gamma a} k_{\gamma a} / \mu_a$, es decir, tensor de permeabilidad.

- ✓ Para modelar la curva de retención y/o la relación entre la succión y el grado de saturación se utilizó la formulación de Van Genuchten:

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} \left(1 + \left(\frac{P_g - P_l}{P} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right)^{-\lambda}$$

Donde,

$P = P_0 * \sigma / \sigma_0$, representa la tensión superficial a una temperatura de referencia.

σ = tensión superficial que depende de una temperatura que sigue una ley empírica expuesta por Custodio y Llamas (1983), $\sigma = 0.03059 \exp\left(\frac{252.92}{273.715+T}\right)$ (N/m).

- ✓ La ley de Fick gobierna el flujo advectivo del vapor del agua en el gas:

$$i_g^w = -D_g^w \nabla \omega_g^w = -(\phi \rho_g S_g \tau D_m^w I + \rho_g D_g) \nabla \omega_g^w$$

Donde,

i_g^w = flujo másico no advectivo de agua en el gas.

D_g^w = difusión molecular.

D_g = tensor de dispersión mecánica.

ω_g^w = fracción másica de agua en el gas.

τ = tortuosidad del medio.

5.3 Principales características de Code_Bright

- ✓ Ofrece opciones que permiten resolver problemas desacoplados y acoplados. Por ejemplo: Los problemas hidro-mecánicos, termomecánicos, hidrotérmicos pueden ser resueltos si la situación física requiere uno de estos enfoques.
- ✓ Tipos de análisis: Una dimensión (deformación confinada uni-axial y axi-simétrica). Dos dimensiones (deformación plana y axi-simétrica). Tres dimensiones.
- ✓ Varios tipos de elementos.
- ✓ Leyes constitutivas: cada ley definida como un conjunto de parámetros. En algunos casos se pueden elegir diferentes tipos de relaciones.
- ✓ Condiciones de frontera:
 - Problema mecánico: fuerzas y tasa de desplazamiento en cualquier dirección espacial y en cualquier nodo.
 - Problema hidráulico: caudal másico de agua y aire prescrito y presión de líquido / gas prescrita en cualquier nodo.
 - Problema térmico: flujo de calor prescrito y temperatura prescrita en cualquier nodo.
- ✓ Criterios de convergencia: Tolerancias para el error absoluto y relativo independiente para cada incógnita. Tolerancia para la convergencia residual de cada problema (mecánico, hidráulico, etc.). El nodo en peores condiciones se utiliza para verificar la condición de convergencia.
- ✓ Opciones de salida: Evolución temporal de variables en nodos o elementos. El usuario debe decidir 'a priori' las variables nodales o de elemento que se emitirán en todo momento (absolutamente todas las horas calculadas se emitirán para algunas variables). Mapas de contorno en el dominio de la solución. Se pueden usar variables nodales o de elementos para dibujar mapas de contorno. Sin embargo, en el segundo caso es necesario realizar una interpolación que puede ser difícil debido a la falta de continuidad de las variables del elemento.

5.4 Desarrollo del modelo en Code_Bright

En el desarrollo de este apartado se detallaran una a una las funciones utilizadas del programa para llevar a cabo el predimensionamiento de la columna de infiltración.

1. Delimitar la geometría usando puntos, líneas y superficies.
2. Definición de condiciones.
3. Generación de la malla.
4. Correr el programa.
5. Analizar los resultados arrojados.

Esta serie de pasos se realizaron con caudales diferentes (tres para ser precisos) , y con estos ajustes se obtuvieron resultados, los cuales se analizaron y sacaron conclusiones adaptadas a la situación que se tenía.

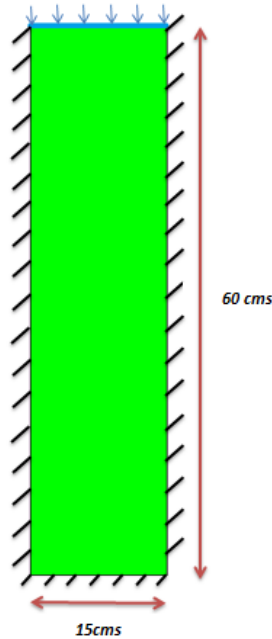
5.4.1 Geometría

En el software GID, utilizado en el pre y post procesamiento de simulaciones numéricas, para el trazado de diversas geometrías se utilizan los comandos de dibujo de puntos, líneas, superficies y volúmenes. En este caso se utilizó una sección rectangular con 60 centímetros de altura y 30 centímetros de ancho pero en el programa se procedió a dibujar un rectángulo de 60 por 15, ya que el modelo se realizó utilizando los conceptos de simetría de ejes alrededor del eje Y.

Posteriormente se le impuso una condición de contorno de flujo en la parte superior del rectángulo y flujo nulo en la base y a los lados de la geometría. En la línea superior se aplicara un flujo de agua para que vaya infiltrando a lo largo de columna. Se infiltrara agua en la columna de suelo hasta que el medio se sature y por ende su presión de agua sea cero. Entonces el programa automáticamente trabajara a una presión de líquido cero.

Además se creó una superficie para todo el conjunto, donde se impusieron incógnitas iniciales como una succión correspondiente a -40 MPa y una porosidad con un valor de 0.32.

Flujo de agua impuesto



5.4.2 Datos del problema

Los datos del problema incluyen todos los datos generales del problema. Esto significa que no está relacionada con una entidad geométrica y no cambia en cada intervalo de tiempo. Se puede introducir con el comando Problem Data o en la ventana de datos del problema. Si se ingresa en una ventana, los datos no se aceptan hasta que se pulse el botón Aceptar. Estos datos pueden ser introducidos antes o después del mallado.

En la figura 25 se observa una pestaña en la que se introducen datos como el nombre del problema y además de esto se puede configurar que el programa tenga una ejecución completa, es decir, no tan solo se generaran ficheros con datos de salida. En esta pestaña también se le puede asignar datos como la asimetría y cuál será el valor de la gravedad.

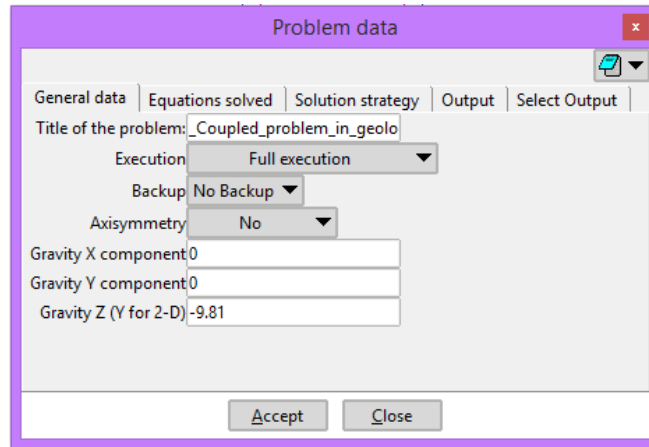


Figura 28.Datos generales en GID.

En la segunda pestana que presenta la figura 26, presenta las ecuaciones que se irán a resolver en el problema. En este caso la ecuación a resolver será la del balance de masa de agua con presión de líquido desconocida P_l y donde se fija una temperatura constante de 20 C. En este problema no se tomara en cuenta la resolución del problema mecánico.

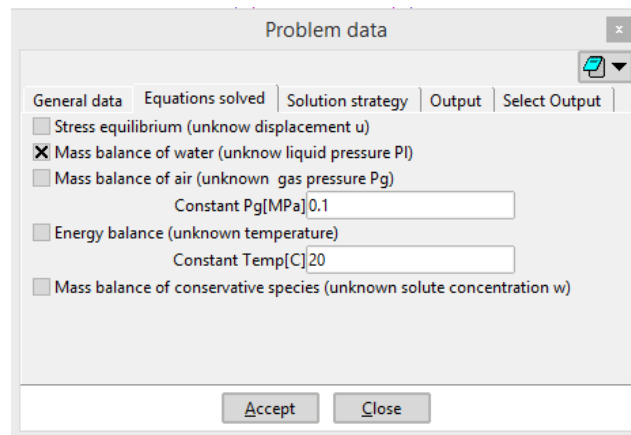


Figura 29.Ecuaciones a resolver en GID.

En cuanto a la estrategia de solución del problema se consideró un paso de tiempo del tipo 1 y se impusieron algunas condiciones y términos que posibilitaron tener soluciones más optimizadas, lo cual permite que haya convergencia en el modelo y que se obtengan resultados más acertados. Esto quiere decir que el programa arroja y calcula una solución más eficaz.

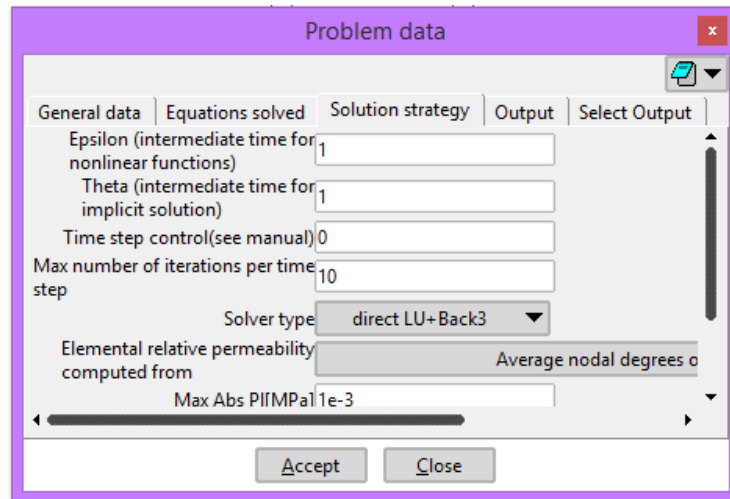


Figura 30.Estrategia de la solución en GID.

Por último, en la pestaña de output se ha especificado que la frecuencia de escritura de los datos y/o resultados sea cada 20 cálculos y que se escriba toda la información relevante que se necesita para la resolución del problema.

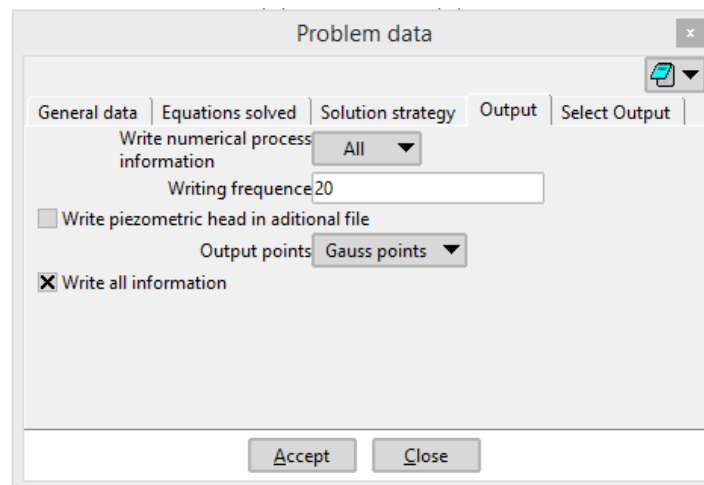


Figura 31.Frecuencia de escritura de resultados.

5.4.3 Materiales

Todos los materiales deben ser definidos a partir de un material genérico. Los siguientes pasos muestran cómo asignar materiales y hacer modificaciones:

- ✓ Creación de nuevos materiales: Para crear nuevos materiales, se debe escribir un nombre de material y completar las leyes constitutivas necesarias y hacer un Aceptar datos para validar los datos introducidos. Es necesario crear un material antes de asignarlo en la geometría. En este caso en particular se utilizó el nombre de arena y se asignaron las propiedades necesarias.
- ✓ La asignación debe respetar la estructura jerárquica de las entidades (es decir, no puede asignar un material a una línea perteneciente a una superficie que acaba de ser identificada con otro material). Este tipo de error puede crear conflictos.
- ✓ Las modificaciones posteriores en los parámetros de los materiales asignados no requieren un proceso de re-mallado.

Las propiedades de los materiales pueden variar en cada intervalo o mantenerse constante. Cada ley constitutiva se define con dos tipos de datos:

1. Cada ley constitutiva es diferenciada por el índice ICL. Por ejemplo, ICL = 6 es la curva de retención. Se consideran grupos de ICL, por ejemplo se utiliza ICL = 21 a 27 para el modelo termoelastoplástico para suelos no saturados.
2. Parámetros para la ley constitutiva. Para cada ley constitutiva se deben introducir una serie de parámetros: ITYCL y de P1 a P10. El primero (ITYCL) es un entero que indica qué opción entre las disponibles se utiliza y P1 a P10 son números que corresponden a parámetros en una ecuación dada.

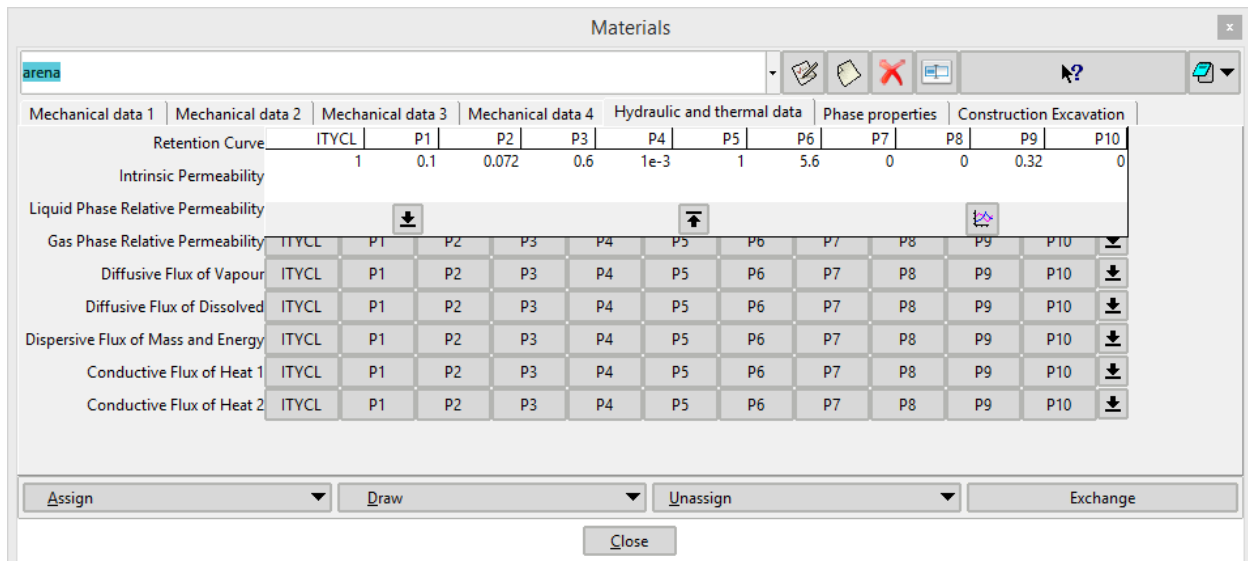


Figura 32. Materiales utilizados en GID.

5.4.4 Condiciones

Las condiciones son todas las propiedades de un problema, excluyendo materiales, que pueden ser asignados a una entidad. En este concepto se han incluido varios tipos de condiciones: condiciones de Flujo, incógnitas iniciales, porosidad (y otras variables), ubicación de evolución del tiempo, etc. Se asigna (Punto, Línea, Superficie o Volumen en modo de visualización de geometría y Nodo o Elemento en el modo de visualización de malla) y se seleccionan diferentes tipos de condiciones. Debe tenerse en cuenta que las condiciones asignadas en el modo de visualización de malla no se asignarán en cada nuevo proceso de mallado.

Para la asignación de la condición se deben tener en cuenta los siguientes puntos: Las condiciones de flujo, las incógnitas iniciales, la porosidad (y otras variables) se asignan con las entidades en la siguiente orden: Puntos, líneas, superficies y volúmenes (es decir, el nodo toma Flux_Point_B.C rechazando un Line_Flux_B.C. asignado previamente).

La línea verde en la parte superior del cuadrado en la figura 31, representa un flujo de agua. Se trata de un caudal de $5 \times 10^{-2}) \text{ Kg/m}^2\text{s}$ que ira infiltrado hasta saturar la columna de suelo.

Las condiciones que aplican a las superficies son las siguientes:

Se aplicaron a la superficie incógnitas iniciales como la porosidad de 0.32 y una succión inicial de -40 mPa.

5.4.5 Mallado

Se creó una malla de elementos finitos y se le aplico a la superficie definida anteriormente. Esta malla consta de elementos cuadriláteros ya que se adaptan bastante bien a la constitución del problema a resolver.

Las características de la malla son las siguientes: el número de nodos es de 561 y de elementos es de 512.

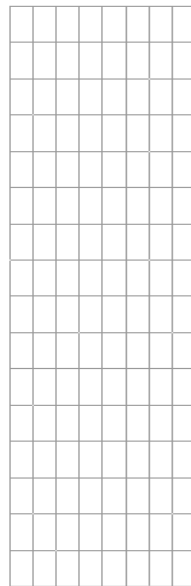


Figura 35.Malla en Gid.

5.5 Casos desarrollados en Code_Bright

Caso 1. Se analizaron 6 puntos a diferentes profundidades correspondientes a 3.75, 18.75, 26.25, 33.75, 41.25 y 56.25 centímetros. El caudal aportado fue de 5×10^{-2} $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

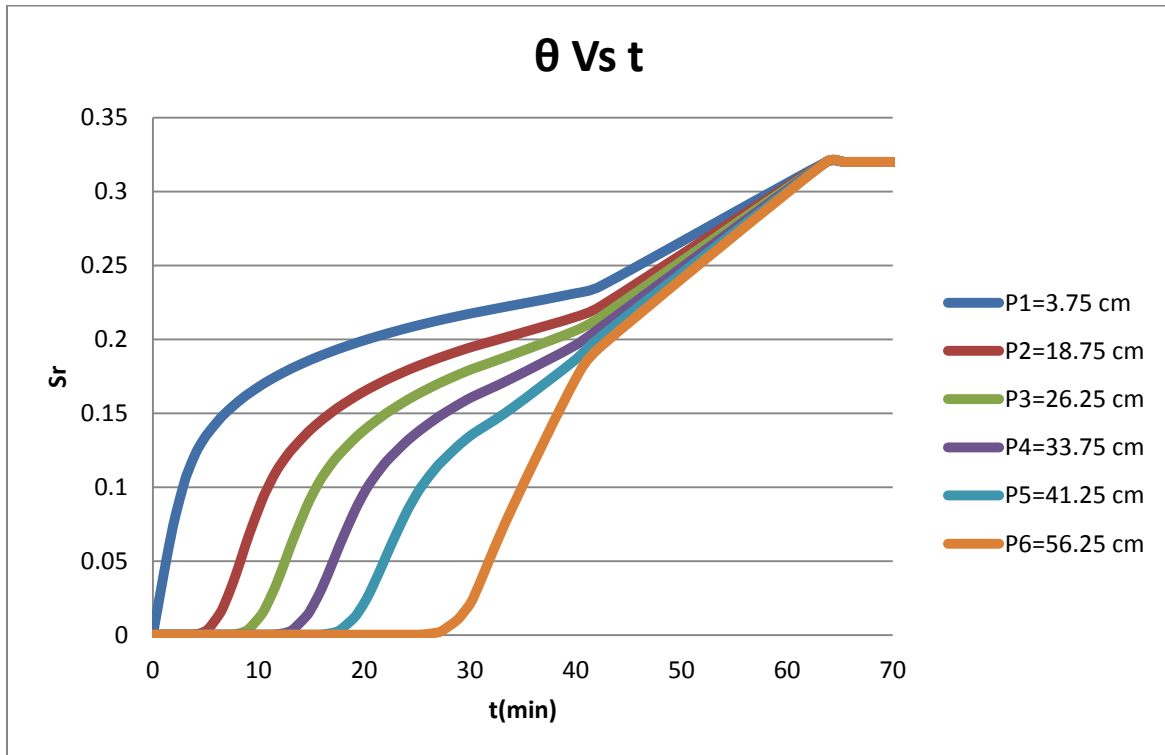


Figura 36. Grafica contenido de agua versus tiempo.

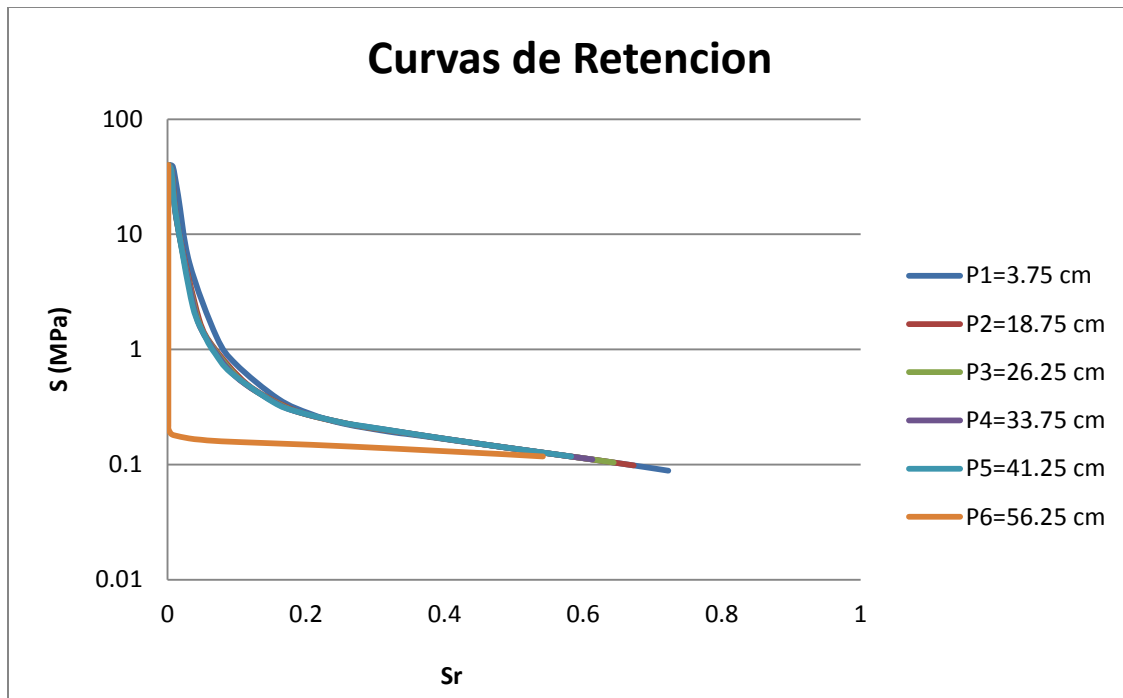


Figura 37. Curvas de retención de cada punto.

Se construyó estas curvas de retención con los valores arrojados por el programa de la saturación y del logaritmo de la succión.

Bajo estas condiciones la muestra saturara en un tiempo de 63.64 minutos lo que corresponde a 1.06 horas.

Caso 2. Se analizaron 6 puntos a diferentes profundidades correspondientes a 33.75, 18.75, 26.25, 33.75, 41.25 y 56.25 centímetros. El caudal aportado fue de 5×10^{-3} $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

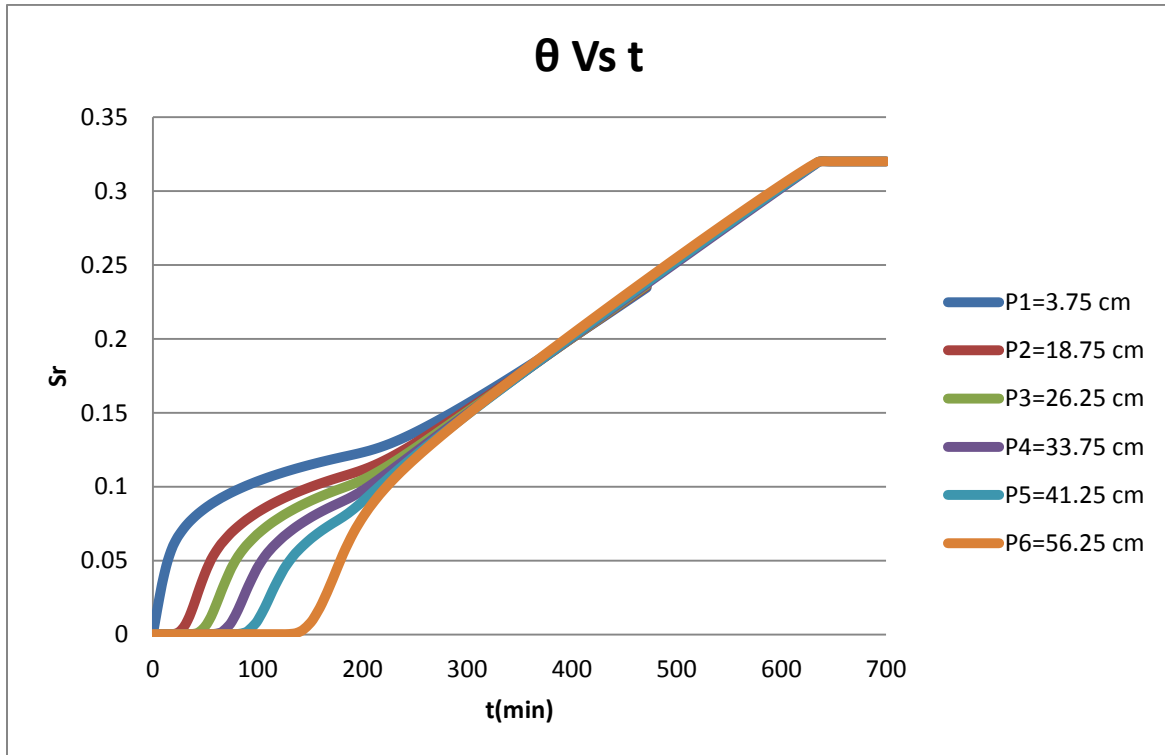


Figura 38. Grafica contenido de agua versus tiempo.

En esta grafica se observa como el contenido de agua va resultando ser un valor proporcionalmente más bajo que la saturación pero que cuando la muestra llega a saturarse por completo el contenido de agua asume el valor de la porosidad que es 0.32.

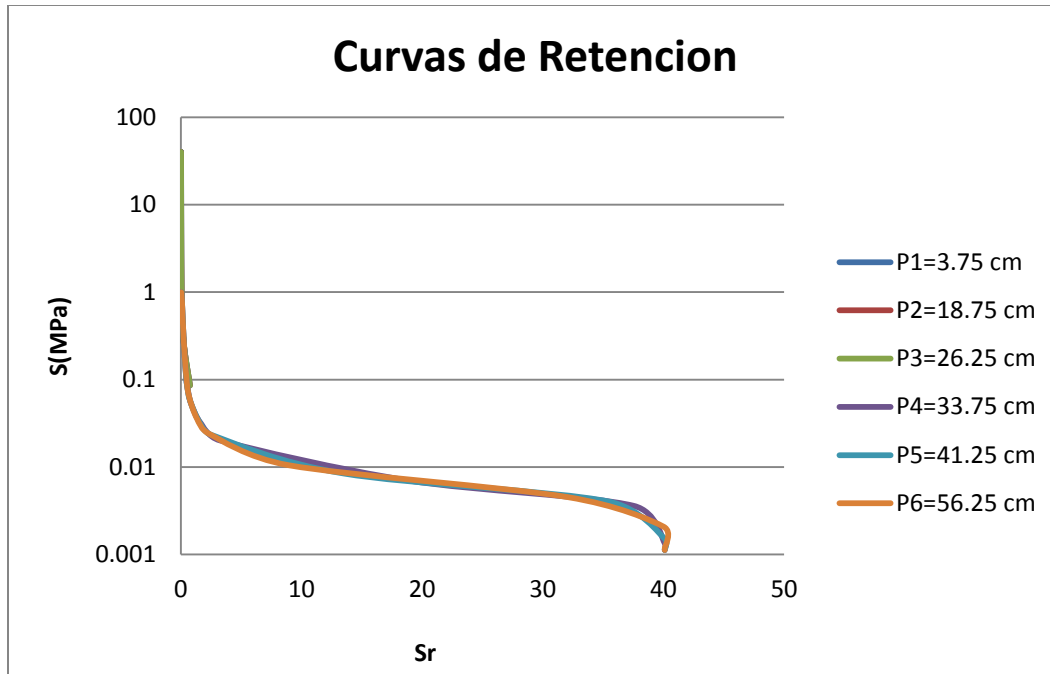


Figura 39. Curvas de retención para cada punto.

Caso 3. Se analizaron 6 puntos a diferentes profundidades correspondientes a 33.75, 18.75, 26.25, 33.75, 41.25 y 56.25 centímetros. El caudal aportado fue de $5 \times 10^{-4}) \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

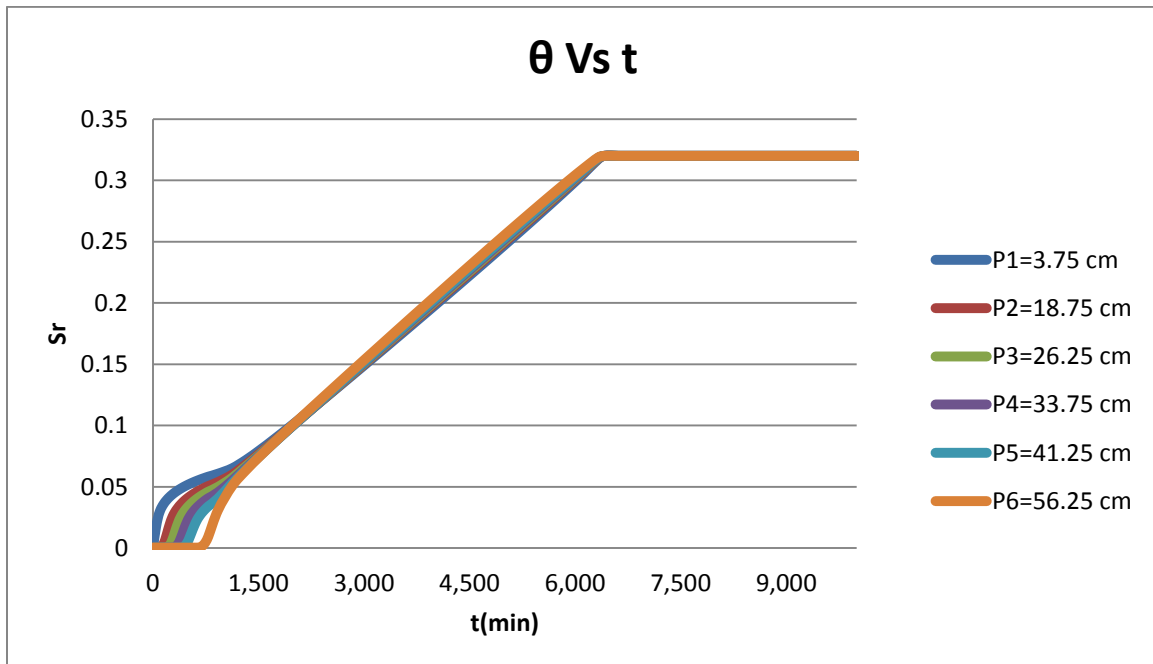


Figura 40. Grafica contenido de agua versus tiempo.

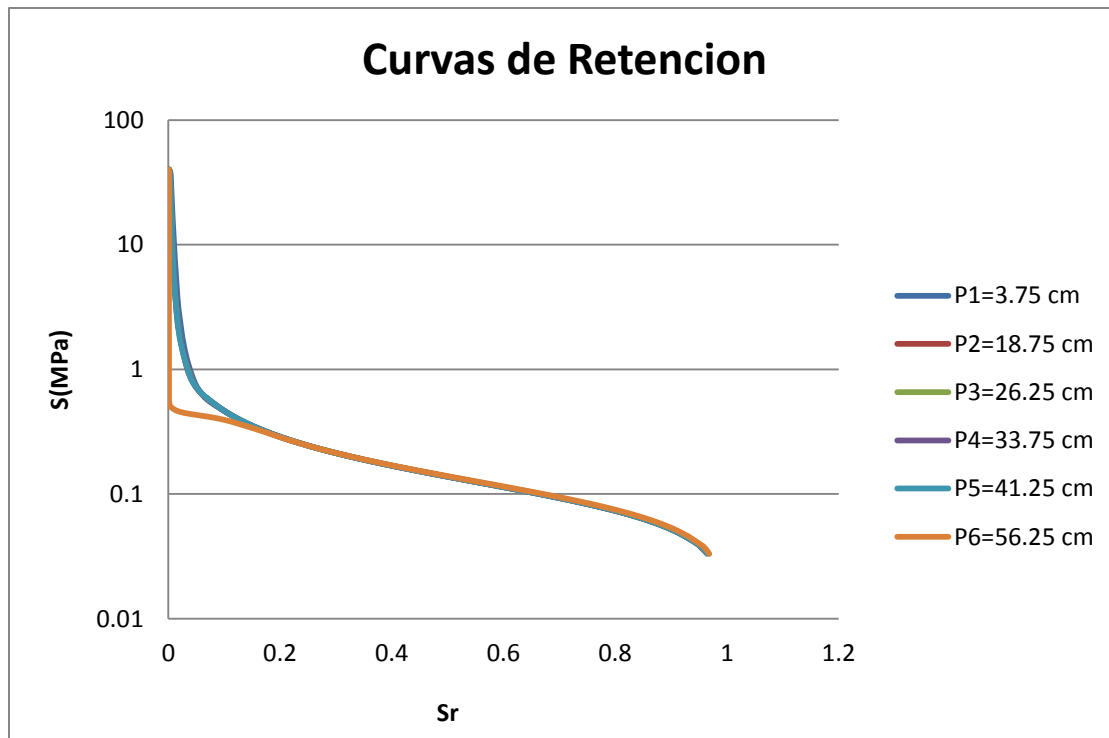


Figura 41. Curvas de retención para cada punto.

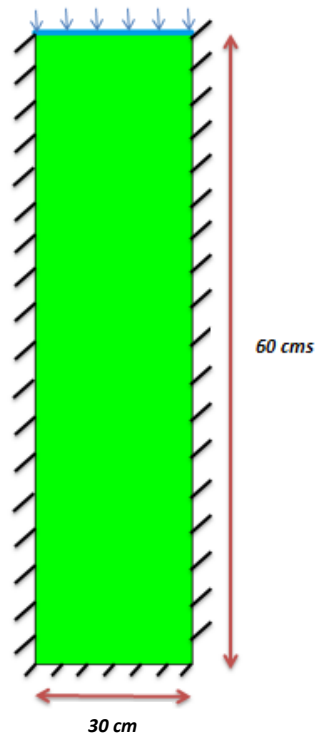
La muestra se satura a los 6371.33 minutos, es decir 106.19 horas.

Cabe destacar que a medida que se iba disminuyendo el caudal en una proporción de 1×10^{-1} del tiempo que se tomaba la muestra en saturar iba aumentando en la misma proporción, es decir iba aumentando 10 veces más.

5.5.1 Conclusiones

Luego de estudiar las gráficas y resultados brindados por el Code_Bright, propongo el siguiente modelo para montar la columna de infiltración en el laboratorio:

$$5 \times 10^{-2} \text{ Kg/m}^2 \text{ s}$$



Para colocar los sensores de contenido de agua, conductividad eléctrica y succión propongo las alturas de 33.75, 18.75, 26.25, 33.75, 41.25 y 56.25 centímetros y un tiempo de realización del ensayo de 1.06 horas.

Como se puede observar en la figura 6 (contenido de agua versus tiempo), la muestra se va saturando con una frecuencia de tiempo tal que nos permite apreciar los cambios que van ocurriendo con la muestra en cuanto a sus propiedades, así como los datos de interés para el análisis en cuestión y se ve claramente como el frente de humectación va avanzando a lo largo de la columna.

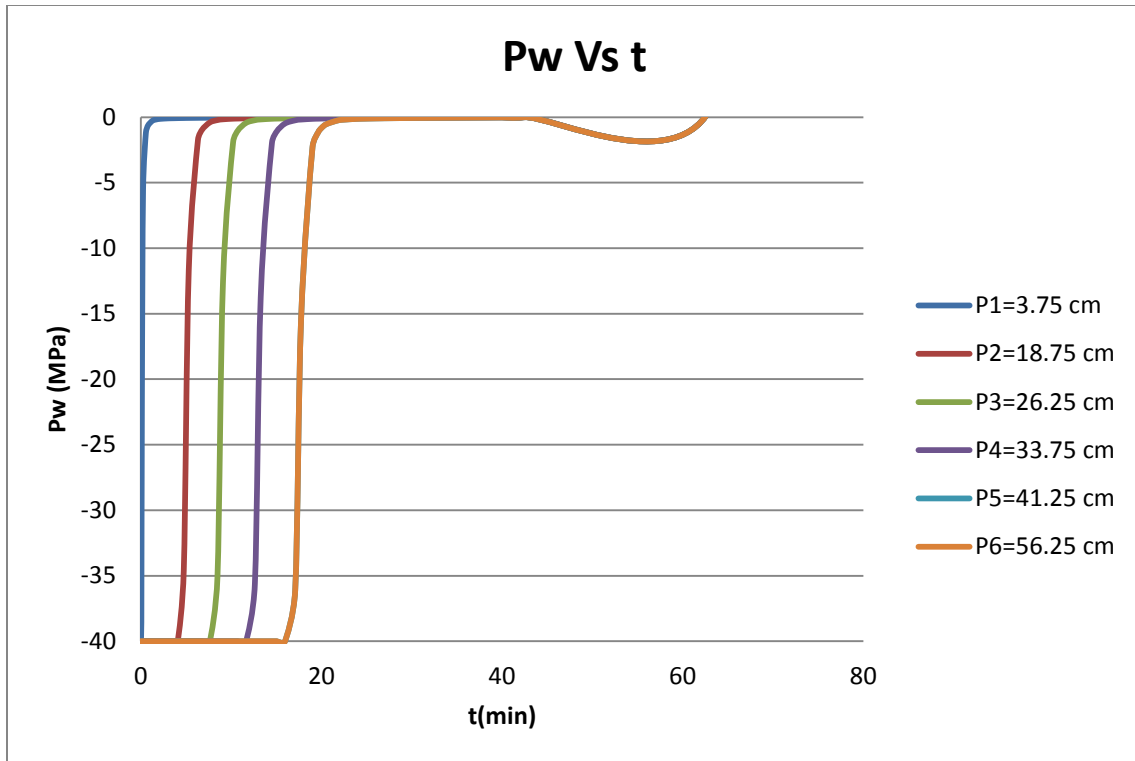


Figura 42. Presiones intersticiales hasta alcanzar $P=0$ MPa.

El tiempo en que se alcanza una presión intersticial igual a 0 MPa es a los 27.358 minutos.

Esta simulación en Code_Bright nos ha dado unos resultados de cómo debería llevarse a cabo el experimento, pero esto no es posible en su totalidad. Por ejemplo, en el número de sensores arrojé seis diferentes lugares para colocarlos. Como no se dispone de tal número de sensores se procedió a colocar, los que se tenían disponibles en lugares estratégicos, que abarcaran la columna completa.

En cuanto al caudal de lluvia que se le aplicaría a la columna de suelo, se tomó como referencia unos umbrales de lluvia que provocaban rotura en el morrena (dato proporcionado por Marcel Hurlimann). Y además, se aplicaba la lluvia cada vez que el agua se infiltraba dentro de la masa terrea y la lámina de agua en la superficie desaparecía.

6. Análisis de medidas arrojadas por sensores

6.1 Introducción

En el laboratorio de hidrogeología de la Universidad Politécnica de Cataluña se realizó un experimento de laboratorio, a pequeña escala, con los propósitos de analizar y comprobar el buen funcionamiento de los sensores instalados, que en este caso fueron 10HS Y MPS-2.

En primera instancia, se tenía pensado realizar el experimento varias veces desde el día 4 de mayo hasta el día 10 de Mayo del año en curso, pero problemas en el equipo solo permitieron hacer el experimento una vez, del día 11 de Mayo hasta el 12 del mismo mes.

Como se ha mencionado anteriormente, el experimento se basó en un recipiente de metacrilato en forma cilíndrica de aproximadamente 0.42 m^3 de volumen, el cual se rellenó con material de suelo que provenía de la zona estudiada, de la Cuenca El Rebaixader, cerca de la población de Senet Alta Ribagorça, Lleida. El suelo consistía en una mezcla de till supra-glaciario, till sub-glaciario, canal y cono. Esto se debió a que el material de una sola zona no era la cantidad suficiente para rellenar la columna.

Entre las variables que se querían controlar y ver como evolucionaban, están el contenido volumétrico de agua y el potencial de agua (Succión). Para lograr este fin se colocaron varios sensores a diferentes profundidades a lo largo de la columna. Los 3 sensores 10HS se encontraban a, midiendo desde arriba, 10, 30 y 50 centímetros y los 2 sensores MPS-2 estaban colocados a 10 y a 50 centímetros.



Figura 44. Esquema real de la columna con sensores.

Los sensores que median variables de interés estaban conectados a un datalogger modelo CR1000 de Decagon, para poder tener un registro de los datos arrojados por los sensores. La frecuencia de medida de los datos era de 30 segundos, aunque luego de que se tenían los datos se llegó a la conclusión de que no eran necesarias tantas medidas.



Figura 45. Sensores de la columna conectados al datalogger.

6.2 Resultados de los sensores

Se mencionó antes que los sensores estaban conectados al datalogger CR1000 y que este tomaba medidas cada 30 segundos. Los datos que arrojaban cada una de las lecturas eran los siguientes:

Tabla 10. Datos proporcionados por los sensores.

Fecha y Hora de medida	VWC a los 10 cm	VWC a los 30 cm	VWC a los 50 cm	Wpot a los 10 cm	Wpot a los 50 cm	Temp en ºC a los 10 cm	Temp en ºC a los 50 cm
------------------------	-----------------	-----------------	-----------------	------------------	------------------	------------------------	------------------------

Es importante señalar que los sensores MPS-2 además de proporcionar los valores de la succión del suelo también pueden registrar medidas de la temperatura. Es por esto que a las profundidades de 10 y 50 centímetros se saben las temperaturas.

Con respecto a los sensores 10HS se recuerda que anteriormente se hizo una calibración y que los datos que se tomen tendrán que ser procesados por la ecuación resultante. En este caso la información que interesa son directamente los VWC no los mili voltios como fue el caso de la calibración.

Como ya se han mencionado y explicado cada uno de los factores que se tienen que tomar en cuenta, los resultados se pueden estudiar y analizar para sacar conclusiones.

En este análisis se manejó miles de datos, por lo que convino que se presentaran los gráficos provenientes de esos mismos datos, para mostrar estos resultados y estudiarlos.

6.2.1 Transformación de datos VWC sensor 10HS

Es necesario que los datos que arrojan los sensores 10HS para medir los contenidos volumétricos de agua pasen por una transformación. Los mili voltios deben ser corregidos y convertidos a VWC. Es por esta razón que los mv serán introducidos en una ecuación que dará como resultado VWC.

Es ecuación se obtuvo en el apartado de calibración de este tipo de sensores (10HS).

En la figura siguiente se puede observar la manera en que se obtienen los datos que registran estos tipos de sensores pero sin pasar por ningún tipo de proceso. Las columnas de interés son las que están encabezadas con el nombre de rawVoltage.

Tabla 11. Datos del sensor 10HS sin transformar.

<i>Fecha y hora</i>	<i>rawVoltage(1)</i>	<i>rawVoltage(2)</i>
5/11/2017 16:03	0.864016	0.896137
5/11/2017 16:03	0.864013	0.895944
5/11/2017 16:04	0.864004	0.896153
5/11/2017 16:04	0.863968	0.896123
5/11/2017 16:05	0.863904	0.896138

Tabla 12. Datos transformados.

<i>Fecha y hora</i>	<i>VWC(1)</i>	<i>VWC(2)</i>
5/11/2017 16:03	0.180711	0.203195
5/11/2017 16:03	0.180707	0.203061
5/11/2017 16:04	0.180704	0.203206
5/11/2017 16:04	0.180667	0.203186
5/11/2017 16:05	0.180633	0.203191

6.2.2 Análisis de los datos

Aquí se describirán las etapas de mojado que se llevaron a cabo. Se procedió a crear lluvias artificiales las cuales se explicarán a continuación:

✓ Lluvia ficticia 1

Esta se aplicó sobre la columna de suelo cuando se encontraba totalmente seca, solo con el contenido de agua inicial.

Cuando se habla de lluvia ficticia se refiere a agregar una cantidad de agua específica de forma manual sobre la superficie de la columna y dejar que este vaya infiltrando naturalmente. Con respecto a la temperatura, después de obtener los datos se puede observar que a 10 cm de profundidad las temperaturas máximas y mínimas presentan fluctuaciones mayores, que a 20 cm de profundidad. Esto se debe a que las medidas arrojadas por el sensor MPS-2 que está más cerca de la superficie, sufrió los efectos de los cambios de la temperatura del ambiente, y que está a los 50 cm se encontraba más protegido por estar más enterrado.

Tabla 13. Información de lluvia ficticia 1.

<i>FECHA/HORA</i>	<i>LITROS AGUA</i>	<i>HORA SIN LAMINA DE AGUA EN SUPERFICIE</i>
4 MAYO 2017 15:55:00	1	16:05:30
16:06:00	1	16:29:45
16:32:05	1	17:19:10
17:25:00	1	18:47:32

De acuerdo a esta tabla podemos analizar el tiempo que transcurre desde que se crea la lluvia ficticia hasta que el agua infiltra totalmente en la masa de suelo. Esta primera etapa es cuando el suelo no tenía más que la humedad inicial, es decir estaba totalmente seco.

Tabla 14. Infiltración del agua agregada.

<i>Litros de agua acumulados</i>	<i>Tiempo en infiltrar el agua</i>
1	0:10:30
2	0:23:45
3	0:47:05
4	1:22:32

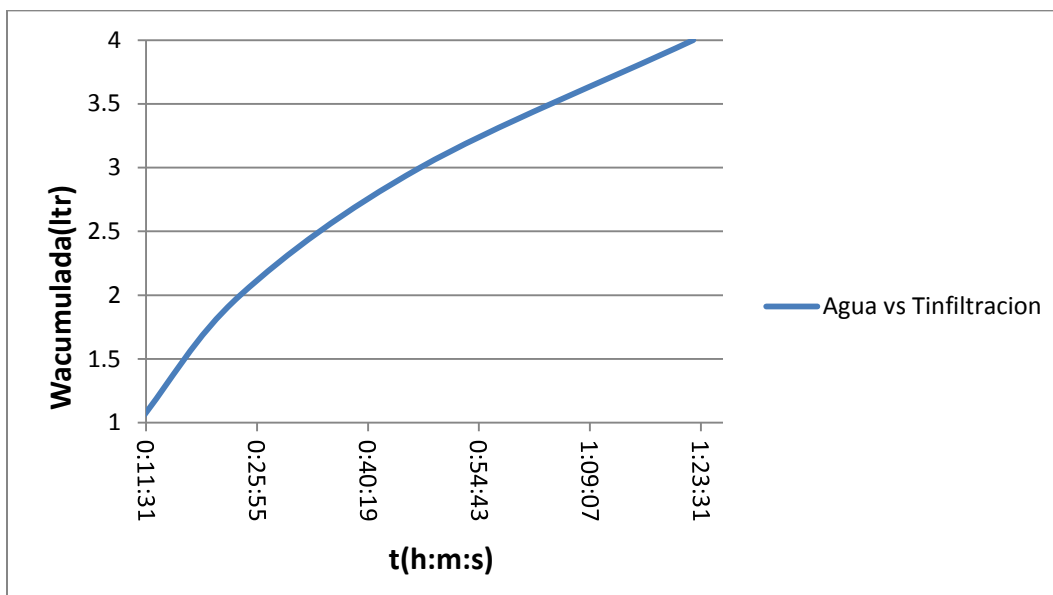


Figura 46. Evolución del tiempo de infiltración a medida que se le va agregando agua.

Tanto en la tabla como en la gráfica se puede apreciar que a medida que el suelo se va saturando su capacidad para transportar agua a través de su composición va disminuyendo. Se observa que al agregar el primer litro de agua al suelo, pasan unos 10 minutos antes de que la lámina de agua que se forma en la superficie desaparezca. En cambio, cuando se le agrega el cuarto litro de agua, esta cantidad de agua acumulada en la superficie se toma aproximadamente una hora y media para infiltrarse en la masa terrea.

A continuación se presentara, de manera secuencial y a través de imágenes, de cómo fue avanzando el frente de humectación a lo largo de la columna:



16:02



16:13



16:33



16:53



17:50



18:40

En las primeras imágenes se aprecia que la diferencia entre los tiempos no sobrepasa los 20 minutos y que en el segundo juego de imágenes han pasado hasta una hora de una imagen a otra. Esto se debe a que a medida que se iba saturando la columna se tomaba más tiempo para poder notar el avance del frente de humectación a través del suelo.

Luego de esto se presentó el problema de que el datalogger no estaba guardando la información por eso no se pudieron presentar ni analizar los resultados arrojados. Solo registro los datos de cuando el suelo estaba seco.

✓ Lluvia ficticia 2

En la creación de una segunda lluvia ficticia, el suelo no se encontraba totalmente seco ya que se había aplicado una primera lluvia anteriormente. El día 4 de Mayo fue cuando se inició el experimento y se humedeció el suelo por primera vez. El día 11 de Mayo se reanudo el experimento nuevamente ya que se quería que el suelo seicara lo más posible a temperatura ambiente.



Figura 47. Situación de la columna al 11 de Mayo.

Se puede observar en la imagen que durante esta semana el agua fue infiltrando hasta casi la base de la columna. Por el color del suelo se aprecia que el agua fue invadiendo los poros del suelo que antes solo estaban rellenos de aire. Es por esto que al agregarle la segunda lluvia la duración de infiltración de la misma era mayor que en la primera etapa del experimento.

Tabla 15. VWC a diferentes profundidades tomadas en el día 4 y 11 de Mayo.

<i>Fecha y hora</i>	<i>VWC(1)</i>	<i>VWC(2)</i>	<i>VWC(3)</i>
5/4/2017 0:00	0.105	0.128	0.138
5/4/2017 0:00	0.105	0.128	0.138
5/4/2017 0:00	0.106	0.128	0.138
5/4/2017 0:00	0.105	0.128	0.138
5/4/2017 0:00	0.106	0.128	0.138
5/4/2017 0:00	0.105	0.128	0.138
5/4/2017 0:00	0.106	0.128	0.138
5/4/2017 0:00	0.106	0.128	0.138
5/4/2017 0:00	0.105	0.128	0.138
5/4/2017 0:00	0.105	0.128	0.138
5/11/2017 16:03	0.227	0.271	0.201
5/11/2017 16:03	0.227	0.271	0.201
5/11/2017 16:04	0.227	0.271	0.2
5/11/2017 16:04	0.227	0.271	0.2
5/11/2017 16:05	0.226	0.271	0.2
5/11/2017 16:05	0.226	0.271	0.2
5/11/2017 16:06	0.227	0.271	0.201
5/11/2017 16:06	0.227	0.271	0.201
5/11/2017 16:07	0.227	0.271	0.2

En esta tabla se demuestra que el contenido volumétrico de agua fue aumentando en toda la columna. Incluso en el sensor 10HS que se encontraba a 50 centímetros, se experimentó un aumento del VWC. Los aumentos de los contenidos volumétricos de agua van de 0.07 hasta 0.14. También se puede observar que el sensor dos colocado a 30 centímetros medido desde la superficie, arrojaba valores mayores que el del primer sensor, a 10 centímetros. Esto ocurre ya que el 10HS (1) se encuentra más cerca de la superficie y más propenso a que el suelo que lo cubre se seque por lo que registra valores inferiores que el otro sensor.

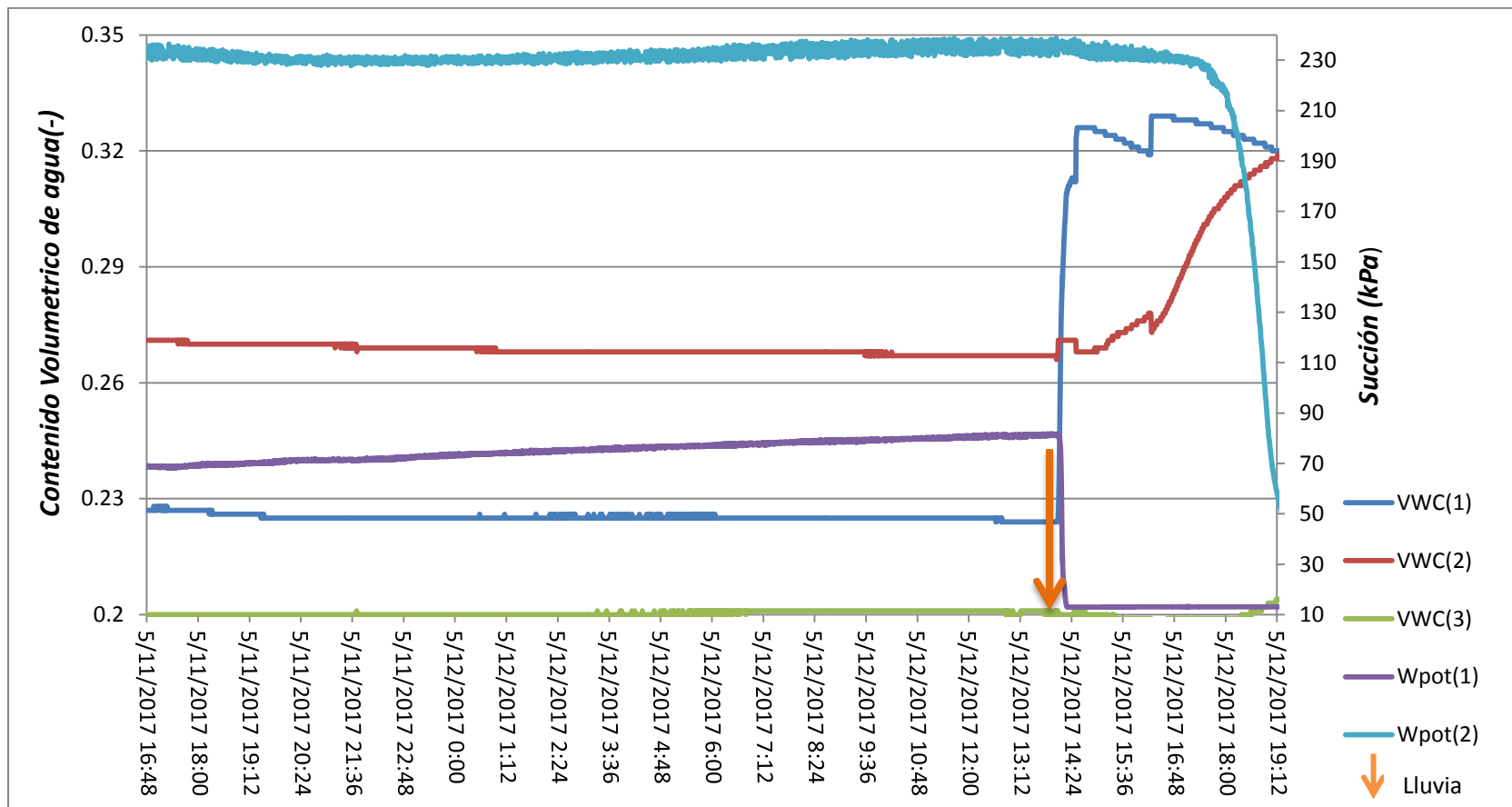


Figura 48. VWC a los 10, 30 y 50 centímetros de profundidad medido desde la superficie y Succión a los 10 y 50 centímetros. Evento de lluvia artificial (representada por la flecha naranja).

Tal y como se puede observar en la imagen solo hubo un episodio de lluvia ficticia valido, ya que la primera vez que se le agrego agua al suelo, cuando estaba completamente seco, el datalogger no registro los datos correctamente y por eso se descartó esa etapa.

Al comparar los datos que arrojan los diferentes sensores 10HS al inicio de la segunda lluvia ficticia se puede observar que los contenidos volumétricos de agua del sensor colocado a los 30 centímetros, es decir a la mitad de la columna, arroja lecturas superiores que los que se encontraban a los 10 y 50 centímetros. A modo de recordatorio, al humedecer el suelo por segunda vez, este no se encontraba totalmente seco. Entonces la explicación de que las medidas del sensor 2 fueran mayores se basa en que el sensor que estaba más cerca de la superficie estaba expuesto a la temperatura ambiente y el que estaba más cerca de la base de la columna no recibió igual cantidad de agua que el que estaba a la mitad.

Era de esperarse que al inicio del experimento (en la primera lluvia ficticia) los resultados del VWC fuesen casi iguales para cada uno de los sensores a diferentes profundidades. Esto se creía porque el suelo fue depositado y compactado en cada una de las tongadas de manera homogénea dentro de la columna de metacrilato.

Al añadirse agua en forma de lluvia ficticia se puede apreciar un ascenso bastante brusco del VWC (1), esto se debe a que al estar más cerca de la superficie está más propenso a recibir agua de la agregada manualmente más rápido que los otros sensores, por lo que el aumento de la cantidad de agua se manifestara primero en este sensor. El segunda sensor también experimenta ascensos en los valores de VWC pero estos cambios son muchos más suaves que los del primer sensor.

Otro punto a tomar en consideración es que las medidas de los contenidos volumétricos de humedad presentan oscilaciones que se presentan en los ciclos de día-noche, esto quiere decir, que la influencia de la humedad relativa del aire es evidente sobre la columna de suelo. Durante el día los valores de VWC disminuyen y en la noche y la madrugada aumentan. Como es de esperarse, con el paso de los días, el material va secándose y a consecuencia de esto el VWC baja paulatinamente.

Cabe recordar que los sensores MPS-2, para medir succión, no trabajan correctamente en suelos que estén completamente secos, es por esto que las medidas arrojadas antes de mojar el suelo no estaban comprendidas entre el rango lógico de 5-50 kPa, sino que las sobrepasan, y a consecuencia no se tendrán en consideración al momento del análisis. Esto se puede apreciar claramente en la figura que para valores bajos de VWC las medidas de la succión arrojadas no tienen lógica alguna. Es hasta el momento en que los VWC alcanzan valores de aproximadamente unos 0.25 que la succión comienza a arrojar medidas que pueden empezarse a tomar en cuenta.

Cuando se dice medidas lógicas se refiere a que cuando el contenido volumétrico de agua es alto el valor de la succión es bajo, y viceversa. Eso quiere decir que si los sensores de 10HS presentaran valores altos desde un principio entonces los valores arrojados por los MPS-2 serían correctos y que se podrían tomar en cuenta. Pero esto no es posible ya que al inicio del experimento el suelo se encontraba totalmente seco y los contenidos de agua eran bajos.

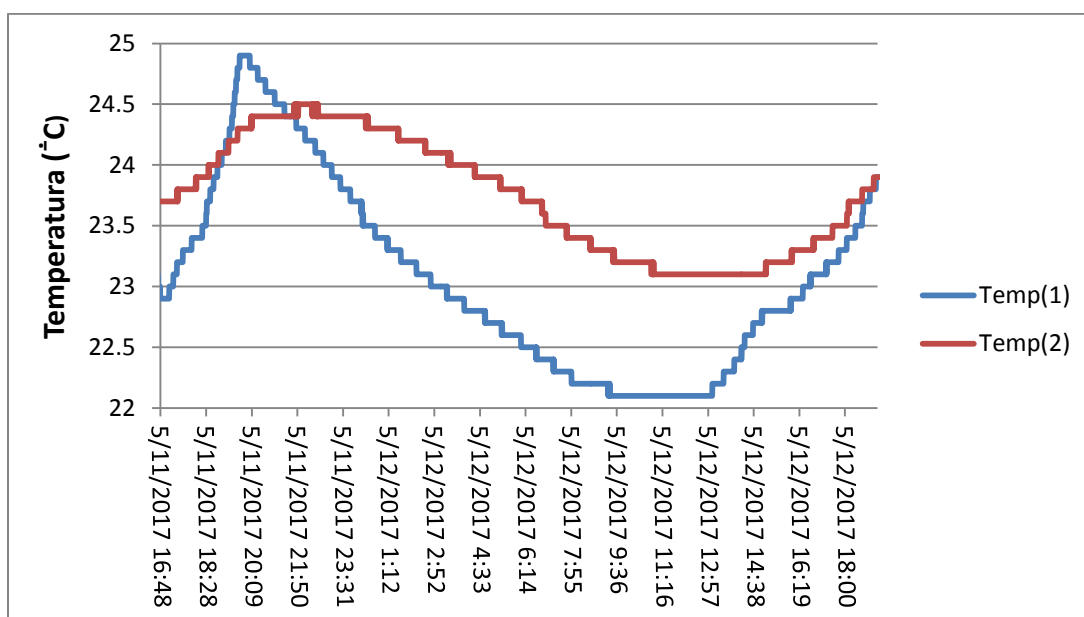


Figura 49. Variación de la temperatura a lo largo del experimento.

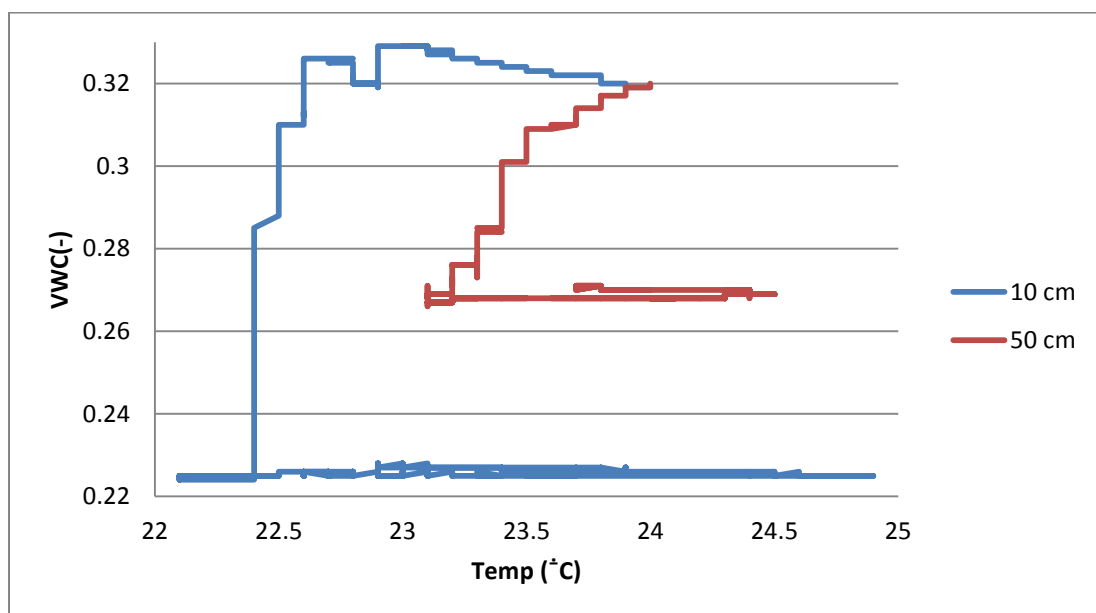


Figura 50. VWS vs Temperaturas.

Luego de analizar los resultados y graficas se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- ✓ Aunque se intentó colocar y compactar cada tongada de suelo de la forma más homogénea posible, existe la posibilidad de que haya una pequeña diferencia en cuanto a la densidad del material que esta alrededor de cada uno de los sensores. Esta puede ser la razón de que al intentar comparar los valores de succión con respecto a los valores de contenido volumétrico de agua, estos no resulten correctos, ya que se tienen valores bastante altos de succión donde los valores de VWC son altos también. Esto ocurre solamente si se comparan valores que tenga mucha similitud, y que además sean del mismo orden de magnitud.

Esto puede explicar el hecho de que el VWC del sensor 2 siempre arrojava valores más altos que los del VWC del sensor 1 y 3, inclusive al inicio del experimento, y el suelo estaba totalmente seco y recién colocado dentro del recipiente de metacrilato. Aquí, los VWC debieron ser prácticamente iguales. Es posible que el material del segundo sensor estuviese más compactado.

- ✓ Los sensores MPS-2 que miden succión no comienzan tener un funcionamiento adecuado hasta que los valores de los VWC alcancen cifras de aproximadamente 0.25. Anteriormente a que esto ocurra, los valores que arrojaron los MPS-2 oscilaban entre 6,000-8,000 kPa (cuando el suelo estaba totalmente seco). También se notó que estos presentan oscilaciones entre el día y la noche. En raras ocasiones, alcanzado ese valor de VWC, el sensor que estaba a los 10 centímetros funcionaba bien pero el de abajo (teniendo más de 0.25 de VWC) arrojaba valores no lógicos.
- ✓ Ambos tipos de sensores, los 10HS Y los MPS-2, denotan en sus medidas la influencia clara y concisa de los cambios de la temperatura ambiente, o para ser más exactos de la humedad relativa del aire. Pero esto ocurría, en mayor proporción, con los sensores que estaban más cerca de la superficie.
- ✓ Tomando en consideración todos los aspectos antes mencionados, se ha podido comprobar que los dos tipos de sensores arrojan información valida y muy parecida a lo que pasa en condiciones reales en el terreno.

7. Conclusiones

El trabajo del Fin de Máster ha permitido diseñar, montar y probar una columna de infiltración que permita evaluar las propiedades hidráulicas de suelos. El sistema ha sido probado en un suelo morrénico que proviene de la zona de alimentación de un cono de deyección, en la cuenca del Rebaixader (Alta Ribagorazana, Pirineos).

La columna incluye medidas de contenido de agua, succión and temperatura durante un proceso de infiltración artificial. Se ha evaluado mediante un cálculo numérico la posición de los sensores, el sistema de alimentación y el drenaje de la columna y se ha procedido a un primer ensayo de prueba de la columna.

Con respecto a los sensores utilizados, el tiempo de respuesta de los mismos fue bastante rápido. Esto no fue una sorpresa ya que se estaba trabajando con un tipo de material granular y altamente permeable.

En cuanto a los resultados del modelo que fue generado en Code_Bright, se pudo apreciar que se simuló la infiltración en el suelo de forma correcta y que los resultados arrojados coincidieron con los que ocurrieron en el experimento que se llevó a cabo.

Al llevar a cabo esta simulación con el desarrollo de un modelo numérico, fue de suma importancia tener disponible y definir de una forma adecuada las diferentes características del modelo en cuestión tales como la geometría, la malla, condiciones iniciales y de contorno, etc. Además, se definieron los parámetros que mejor reprodujeran el comportamiento del suelo, en especial las características hidráulicas, por ser las que representan mayor complejidad cuando se trata de suelos no saturados.

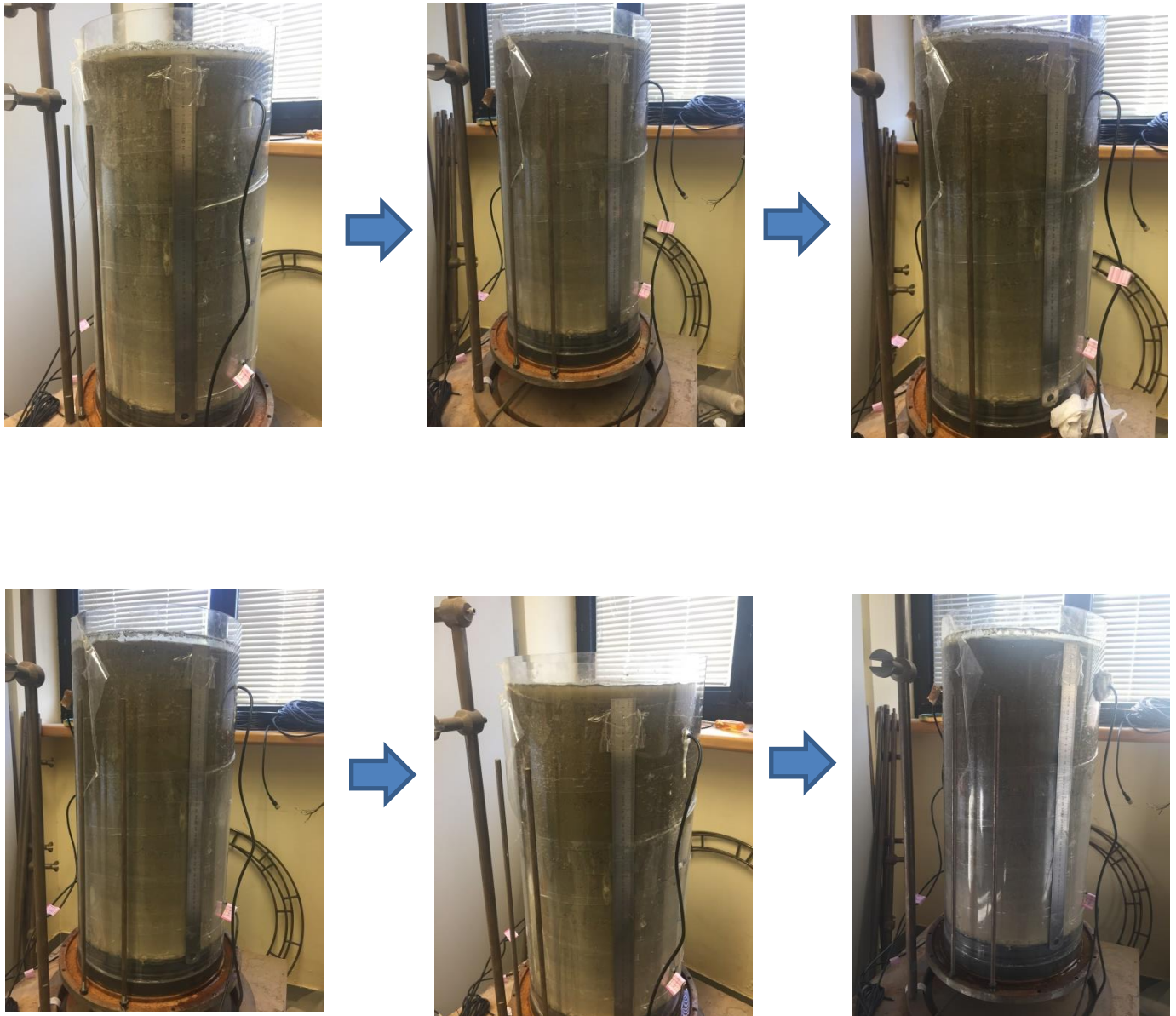
Como líneas futuras, se pretende realizar ensayos con otros materiales, instalar un sistema de evaporación y poder acompañar el todo con modelaciones numéricas realizadas durante el ensayo.

8. Bibliografía

- ✓ Corominas, J. y García Yagüe, A. (1997), Terminología de los movimientos de ladera, IV Simposio nacional sobre taludes y laderas inestables. Granada.Vol. 3, 1051-1072.
- ✓ Corominas, J. (1989a) Clasificación y reconocimiento de los movimientos de ladera. J.Corominas (Ed.) Estabilidad de taludes y laderas naturales, Monografía no 3, Sociedad Española de Geomorfología, Barcelona, págs. 1-30.
- ✓ Decagon devices, Inc. (2008-2010) "Soil moisture sensor, Operator's manual. págs. 1-19"
- ✓ Decagon devices, Inc. (2011) "Dielectric Water Potential Sensor, Operator's manual. págs. 1-24"
- ✓ González de Vallejo, L.I, Ferrer, M, Ortuño, L, Oteo, C (2002): Ingeniería geológica. Prentice Hall. Madrid, 715 pp.
- ✓ Aizpiri García, R. (2010). "Frecuencia de corrientes de derrubios y su relación con la pluviometría: Aplicación a la cuenca El Rebaixader (Pirineo Central)". Tesina. Universidad Politécnica de Cataluña.
- ✓ Vergara Madrid, I. (2012). "Monitoreo de la humedad y de las presiones intersticiales en un depósito de origen glaciar y su efecto en la formación de roturas superficiales: Aplicación en un till en Senet, Alta Ribagorça." Tesina Universidad Politécnica de Cataluña.
- ✓ Carballo Luna, B. (2016). "Infiltración de lluvia en suelo no saturado. Auscultación y simulación numérica en la cuenca El Rebaixader (Pirineo Central)". Tesina Universidad Politécnica de Cataluña.
- ✓ Universidad Politécnica de Cataluña, February 2017 "Code_Bright User's Guide.pags13-75".
- ✓ Gohl, A. (2006). "Estudio experimental de una columna de suelo". Informa científico de prácticas Universidad Politécnica de Cataluña.

Anexos

En la creación de la segunda lluvia ficticia ya el suelo contenía una humedad relativamente alta. Aquí se representa como avanza el frente de humectación en la segunda etapa:



Graficas de la primera etapa de lluvia, cuando el suelo se encontraba totalmente seco:

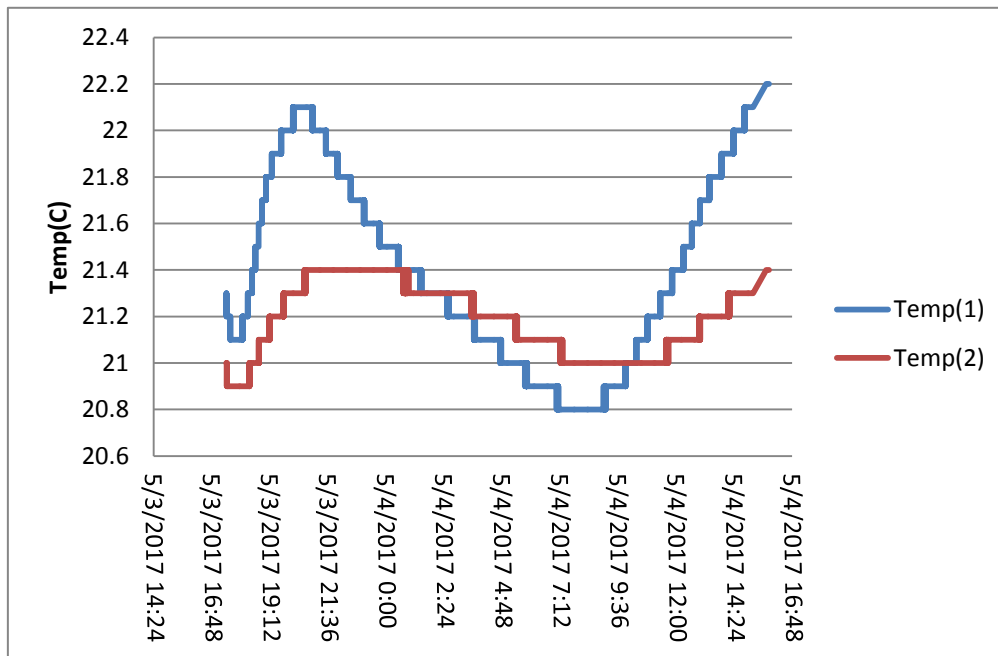


Figura 51. Oscilaciones de las temperaturas a 10 y a 50 cm.

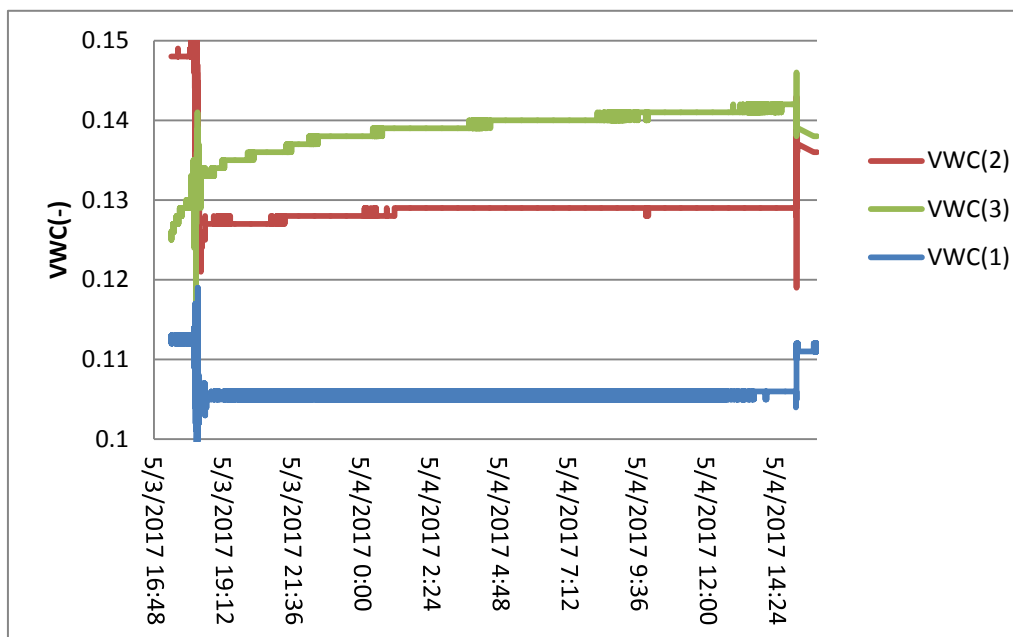


Figura 52. Evolución de los VWC.